



## **Mémoire de fin d'études d'Ingénieur Agronome:**

**Diplôme d'Agronomie Approfondie de l'ENSA Rennes**

**Spécialisation Génie de l'Environnement**

**Option Eau**

---

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE ET TEMPORELLE DU PARTAGE  
RUISSELLEMENT - INFILTRATION POUR LE SYSTÈME SOL-BANANIER À LA SURFACE  
D'UN ANDOSOL DE GUADELOUPE À L'ÉCHELLE LOCALE DU BANANIER

---

***Pierre DESBOIS***

### **Encadrement :**

**Philippe CATTAN :** CIRAD FHLOR, Guadeloupe  
**Stéphane RUY :** INRA CSE, Avignon  
**Antoine FINDELING :** CIRAD AMI, Montpellier

**Soutenu le 21 septembre 2006**



## Sommaire

<b>I.</b>	<b>Introduction : La problématique du ruissellement sous bananeraie en Guadeloupe .....</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>Matériels et méthodes .....</b>	<b>3</b>
<b>A.</b>	<b>Le site expérimental .....</b>	<b>3</b>
1.	La station Neufchâteau et la placette d'étude.....	3
2.	Protocole expérimental .....	4
3.	Les données expérimentales disponibles .....	5
<b>B.</b>	<b>Le traitement des données de 2004 .....</b>	<b>5</b>
1.	Transformation des données en lame d'eau .....	5
2.	Délimitation des épisodes pluvieux et des événements ruisselants.....	6
<b>III.</b>	<b>Résultats : variabilité du partage Ruissellement – Infiltration .....</b>	<b>7</b>
<b>A.</b>	<b>Présentation synthétique des données.....</b>	<b>7</b>
1.	La pluviométrie.....	7
2.	Description synthétique des événements de 2004.....	8
3.	Estimation du Ks.....	10
<b>B.</b>	<b>Analyses des vidéos du ruissellement (2005) .....</b>	<b>10</b>
1.	Les données vidéo d'octobre 2005.....	10
2.	Différentes phases de ruissellement observées .....	11
3.	Les changements de phase sont en relation avec les intensités pluviométriques .....	12
<b>C.</b>	<b>Les coefficients de ruissellement (CR).....</b>	<b>13</b>
1.	Les CR évoluent dans le temps.....	13
2.	Les intensités pluviométriques déterminent des changements dans la dynamique du ruissellement .....	15
3.	Les effets des états hydriques initiaux de la placette ne sont pas mis en évidence .....	17
<b>D.</b>	<b>Les flux d'infiltration .....</b>	<b>18</b>
<b>E.</b>	<b>Discussion et conclusions .....</b>	<b>20</b>
1.	Plusieurs phases de ruissellement gouvernées par les intensités pluviométriques .....	20
2.	Prédominance du ruissellement hortonien .....	21
3.	Mais des interrogations vis-à-vis de ce modèle de fonctionnement.....	22
<b>IV.</b>	<b>Modélisation des phénomènes de ruissellement .....</b>	<b>23</b>
<b>A.</b>	<b>Description, objectifs et limites du modèle.....</b>	<b>23</b>
1.	Principes et hypothèses : un modèle simple et robuste .....	23
2.	une fonction de redistribution de la pluie.....	23
3.	Les fonctions de production et de transfert du modèle .....	24
4.	Stratégie de modélisation .....	25
<b>B.</b>	<b>Paramètres de calage du modèle .....</b>	<b>25</b>
1.	Le choix des paramètres du modèle.....	25
2.	Le calage du modèle .....	26
<b>C.</b>	<b>Applications et validations du modèle pour les événements étudiés.....</b>	<b>27</b>
<b>D.</b>	<b>Discussions et conclusions sur le modèle .....</b>	<b>28</b>
<b>V.</b>	<b>Conclusions et perspectives.....</b>	<b>29</b>
	<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>31</b>

## Index des Figures

Figure I-1: Hétérogénéité de la pluie réellement incidente à la surface du sol sous un bananier (Cattan <i>et al.</i> , 2006)	2
Figure II-1: Carte de répartition de la pluviométrie en Guadeloupe et de localisation de la station Neufchâteau du CIRAD en Guadeloupe (DIREN, 2006).....	3
Figure II-2: Photographie de la placette expérimentale, Station Neufchâteau du CIRAD (Martin, 2004).....	4
Figure II-3: Dispositif expérimental de mesures sur les années 2004 et 2005 sur la placette (d'après Martin, 2004).	4
Figure III-1: Statistiques des précipitations mensuelles de 1998 à 2005 sur la station de Neufchâteau.....	7
Figure III-2: Présentation de l'événement ruisselant du 25 août 2004 à 01h38.....	8
Figure III-3: Comparaison des lames ruisselées et précipitées des 41 événements ruisselants étudiés .....	9
Figure III-4: Histogramme de répartition des intensités pluviométriques sur la période d'étude .....	9
Figure III-5: Résultats des mesures de la capacité d'infiltration à saturation par la méthode du double anneau sur les sites situés autour de la placette expérimentale, Août 2006.....	10
Figure III-6: Schéma descriptif général de la chronologie des phénomènes du ruissellement observés sur les vidéos en cas d'augmentation des intensités pluviométriques .....	11
Figure III-7: Description des phénomènes observés sur la vidéo de l'événement du 31/10/2005 (Annexe 3).....	12
Figure III-8: Visualisation des variations de taux de ruissellement pour l'événement du 28 août 2004 à 11h23 .....	14
Figure III-9: Répartition des valeurs des pentes des graphiques $R=f(P)$ pour les 41 événements ruisselants de 2004 (A gauche : toutes les valeurs de pente ; A droite : seulement les 1ères et 2èmes pentes).....	15
Figure III-10: Comparaison des intensités pluviométriques à la rupture et avant la rupture.....	16
Figure III-11: Répartition des intensités pluviométriques pendant les 5 min suivant la rupture.....	16
Figure III-12: Répartition des intensités pluviométriques avant et après la 1 <sup>ère</sup> rupture des événements ruisselants	17
Figure III-13: Influence de l'état hydrique du sol sur le déclenchement d'un fort taux de ruissellement .....	18
Figure III-14: Comparaison des flux d'infiltration et de ruissellement pour les 1ères phases à CR faibles .....	19
Figure III-15: Comparaison des flux d'infiltration et de ruissellement pour les 2èmes phases à CR forts.....	19
Figure III-16: Répartition des flux d'infiltration (à gauche) et de ruissellement (à droite) pendant les 1ères et 2èmes phases du ruissellement.....	20
Figure IV-1: Schéma synthétique de fonctionnement du modèle .....	25
Figure IV-2: Résultats de la procédure de calage sur l'événement 7 (04/07/2004 à 12h05).....	27
Figure IV-3: Comparaison des CR pour le cas du modèle redistribué (calage et validation) et sans redistribution .	28
Figure IV-4: Répartition des valeurs des critères de Nash en fonction des lames précipitées .....	29

## Index des Tableaux

Tableau III-1: Gamme des volumes d'eau mis en jeu pour les 41 événements ruisselants étudiés.....	9
Tableau III-2: Description des 6 événements retenus pour l'analyse vidéo .....	11
Tableau IV-1: Analyse de sensibilité des paramètres Ksat, A et B par le critère de Nash et Sutcliffe .....	27
Tableau IV-2: Bilan des performances du modèle .....	28

# I. INTRODUCTION : LA PROBLEMATIQUE DU RUISSELLEMENT SOUS BANANERAIE EN GUADELOUPE

En Guadeloupe, la banane est la production traditionnelle la plus exportée et elle joue de ce fait un rôle primordial tant d'un point de vue économique que social. Cette filière très intensive est soumise à une forte pression parasitaire qui induit une utilisation massive de pesticides. Ces pratiques, souvent abusives, amènent des apports considérables de matières polluantes qui entraînent bien évidemment des effets néfastes sur l'environnement par contamination des eaux et des sols.

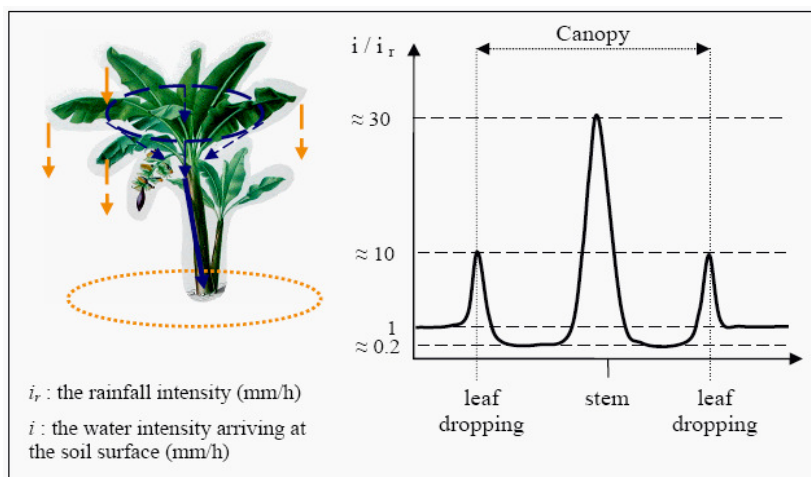
En outre, les zones de cultures de la banane, situées essentiellement sur l'île montagneuse et volcanique de Basse Terre, sont soumises à un climat de type tropical humide. En effet, le relief, perpendiculaire au flux des alizés, régule la pluviométrie abondante tout au long de l'année, ce qui génère une pluviométrie moyenne de 3500 à 4000 mm par an pour les zones de bananeraies. Par ailleurs, les sols de ces bananeraies sont des andosols, c'est-à-dire des sols d'origine volcanique très poreux et dotés d'une capacité d'infiltration très élevée (30 à 300 mm.h<sup>-1</sup>). Ils absorbent la plupart des pluies intenses qu'ils reçoivent et sont donc peu sujets au ruissellement et à l'érosion (Dorel *et al.*, 2000). Leur forte porosité (entre 70 et 80%) leur permet d'avoir une forte saturation en eau ; ils sont de plus soumis à une forte pluviométrie (quantité et régularité) et se dessèchent donc rarement. De ce fait, ils présentent naturellement une structure favorable à l'enracinement du bananier (forte réserve en eau, bonne aération par une importance de la micro et de la macroporosité).

D'autre part, une particularité du système sol – bananier est que lors d'une pluie, le feuillage intercepte et redistribue spatialement les eaux de pluies ce qui interfère sur son incidence réelle à la surface du sol. Cette redistribution spatiale de la pluie par le couvert végétal est primordiale sous les bananiers car la surface et l'architecture des feuilles permettent une capacité considérable d'interception et de redistribution de la pluie incidente (Bussière, 1995). Cet effet interception - redistribution des feuilles du bananier a plusieurs conséquences notoires :

- A l'abri du feuillage, la pluie incidente réelle a une intensité plus faible que celle qui est mesurée au dessus du couvert : c'est l'**effet « parapluie »**.
- On observe une concentration des pluies qui s'écoulent le long des feuilles puis du pseudo tronc (**effet stemflow**) mais aussi un phénomène d'**égouttage** à la périphérie du couvert végétal.

Pour quantifier l'influence du couvert végétal sur cette redistribution des pluies, on définit un indice, le rapport de transmission, qui est le rapport entre la pluie tombant réellement à la surface du sol et la pluie incidente au dessus du couvert végétal. Ainsi, l'intensité de l'écoulement sur le pseudo tronc (stemflow) rapporté à sa section basale peut être 10 à 30 plus élevée que l'intensité de la pluie précipitée, et au contraire beaucoup plus faible sur la surface abritée par les feuilles du fait de l'effet « parapluie » (Cattan *et al.*, 2006). Dans la Figure I-1, on observe que le rapport de transmission est variable dans l'espace, de manière circulaire relativement homogène à partir du pseudo tronc du bananier. De ce fait, à partir d'une pluie incidente d'intensité  $i_r$  donnée, on constate une redistribution majeure des écoulements vers le pseudo tronc (effet stemflow) et l'extrémité des feuilles (égouttage).

De plus, selon Sansoulet (2002), l'énergie cinétique accrue des gouttes de pluie redistribuées par le couvert végétal induit la sédimentation de la fraction argileuse redistribuée par l'impact de ces gouttes, ce qui diminue localement la capacité d'infiltration et entraîne une canalisation du ruissellement.



**Figure I-1: Hétérogénéité de la pluie réellement incidente à la surface du sol sous un bananier (Cattan *et al.*, 2006)**

D'autres travaux dédiés à l'étude des conséquences du fonctionnement hydrologique distribué des bananeraies sur andosols (échelle locale et parcellaire) sur les flux d'eau sur et dans le sol, ont apporté des contributions notables à la compréhension de cette problématique :

- le fort impact de la redistribution de la pluie sur la distribution des flux de drainage : le drainage « gravitaire » (suintement) est égal à 1/2 de la pluviométrie sous bananier contre 1/8 dans l'inter rang (Cattan et Cabidoche, 2002) ;
- le dépassement local de la capacité d'infiltration et l'apparition de ruissellement à l'aval du stemflow, canalisé par la microtopographie, est susceptible de redistribuer des solutés et des agrégats de surface, d'élargir la zone de drainage forcé, et/ou de contribuer à un ruissellement généralisé à l'échelle de la parcelle (Gouyer, 2001 ; Champoiseau, 2002).

Dans ce contexte, un programme national de recherche en hydrologie (PNRH) dont le sujet est « Etude et modélisation à l'échelle locale des transferts de l'eau de pluie concentrée par le bananier à la surface d'un andosol » a été mis en place de 2003 à 2006. Il a pour objectifs d'évaluer l'impact de la redistribution de la pluie par le feuillage du bananier et de l'hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques des sols sur les flux locaux d'infiltration et de ruissellement et d'appréhender leur variabilité spatiale, afin de comprendre et d'élaborer un modèle général de fonctionnement du système sol - bananier. La mise au point d'un modèle mécaniste des transferts hydriques sous bananeraie semble en effet un préalable incontournable à un futur couplage avec le transfert de solutés, rendu indispensable dans le contexte d'emploi non raisonné de grandes quantités d'intrants et de signes évidents de pollution des aquifères (Cabidoche, 2003).

Ce travail, inclus dans ce projet de recherche global, a pour but une caractérisation du partage ruissellement - infiltration à l'échelle locale d'un bananier. Ce mémoire consiste en l'analyse de données expérimentales mesurées dans le cadre de ce projet (Martin, 2004 et Heuzé, 2005) afin de pouvoir décrire la variabilité spatiale et temporelle du partage ruissellement – infiltration à la surface d'un andosol sous un bananier, de proposer un mode de fonctionnement et de tester ces hypothèses par modélisation.

Dans ce mémoire, nous avons choisi de ne pas introduire de chapitre spécialement dédié à l'étude bibliographique car celle-ci a fait l'objet d'un rapport bibliographique préalable rendu au printemps 2006. En outre, même si cette bibliographie s'est sensiblement modifiée et axée sur le partage ruissellement - infiltration et la modélisation, des rappels ont lieu tout au long du texte, ce qui justifie l'absence d'un chapitre bibliographique à part entière.

## II. MATERIELS ET METHODES

### A. LE SITE EXPERIMENTAL

#### 1. LA STATION NEUFCHATEAU ET LA PLACETTE D'ETUDE

Les observations ont été faites sur la station expérimentale du CIRAD FLHOR de NeufChâteau (Figure II-1), située sur la côte au vent de la Basse Terre en Guadeloupe (16°04'38''N, 61°36'04''W, altitude : 250 m). La moyenne annuelle des pluies au niveau de la station s'élève à 3850mm (Météo France).

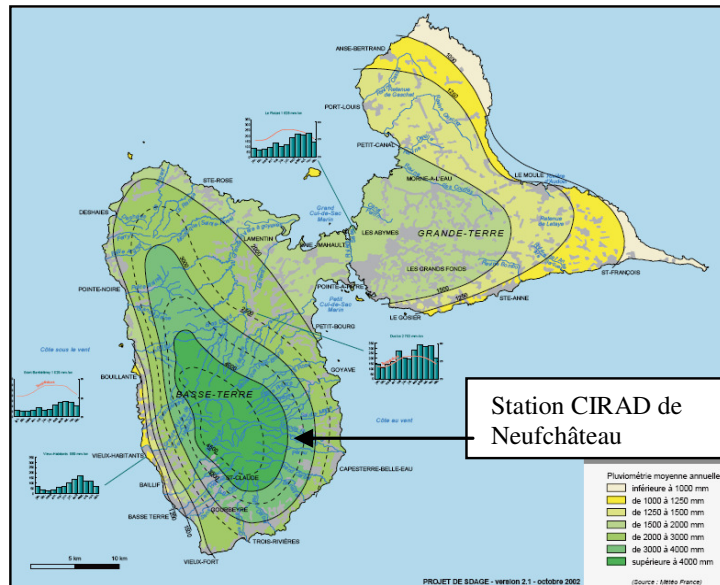


Figure II-1: Carte de répartition de la pluviométrie en Guadeloupe et de localisation de la station Neufchâteau du CIRAD en Guadeloupe (DIREN, 2006)

La volonté de compréhension du fonctionnement hydrologique d'une bananeraie en trois dimensions amène nécessairement une spatialisation de la parcelle qui est alors vue comme un ensemble maillé de bananiers plantés suivant un motif carré de 2,35 m de coté. Pour pouvoir la modéliser, on cherche donc à réduire la compréhension du fonctionnement à l'échelle locale d'un bananier qui représente une maille représentative du système de la parcelle. C'est la raison pour laquelle le projet PNRH s'intéresse tout particulièrement à cette échelle. Ainsi, sur la parcelle « Espérance Haut » de la station Neufchâteau, une placette d'une surface de 8,8 m<sup>2</sup> et de pente moyenne de 12% a été délimitée autour d'un bananier situé à l'intérieur de la parcelle de 0,6 ha de bananiers; cette placette représente l'espace élémentaire initial du maillage. Une photo de cette placette expérimentale est disponible en Figure II-2.

Il est important de noter que, pour une parcelle considérée comme un maillage carré de 2,35 m de coté (soit la distance correspondant à l'espacement moyen des bananiers), la maille élémentaire reviendrait à une surface carrée d'environ 5,5 m<sup>2</sup>. Ici, notre placette a une surface de 8,8 m<sup>2</sup> alors que l'on observe un seul bananier et elle est isolée de l'influence des bananiers alentours sur les flux d'eau au niveau du sol. De ce fait, l'influence de la redistribution de la pluie par le bananier est ici sous-estimée dans les données de ruissellement mesurées. Néanmoins, la redistribution de la pluie par le couvert végétal du bananier est proportionnelle à la pluviométrie ce qui fait que les phénomènes observés sont toujours valables en relatif.



Figure II-2: Photographie de la placette expérimentale, Station Neufchâteau du CIRAD (Martin, 2004)

## 2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le schéma du dispositif expérimental (Figure II-3) de la placette en 2004 nous montre les emplacements des différents appareils de mesures : bac de ruissellement, tensiomètres, lysimètres, collerette pour récolter le stemflow et un partiteur pour le mesurer et le retransmettre. Il nous donne également la micro topographie de la placette qui influence directement les écoulements. Les tôles ont été placées de manière à isoler la placette du reste de la parcelle pour qu'elle soit bien représentative d'une maille de la parcelle entière.

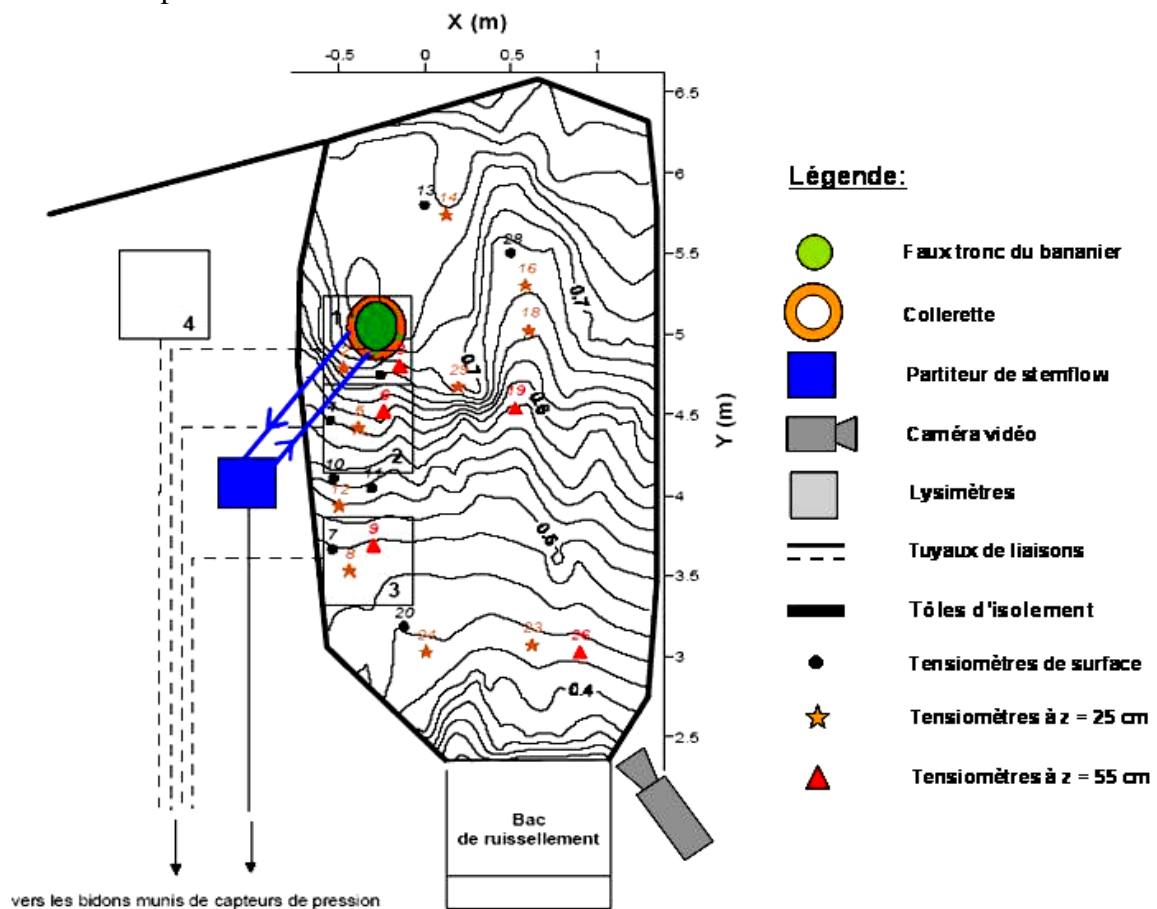


Figure II-3: Dispositif expérimental de mesures sur les années 2004 et 2005 sur la placette (d'après Martin, 2004)



Par ailleurs, les volumes et intensités pluviométriques sont mesurés sur la parcelle grâce à un dispositif composé d'un pluviomètre à augets basculeurs et d'un mât de 5 m de haut muni à son extrémité haute d'un entonnoir (Diamètre : 24 cm ; Surface d'interception : 452 cm<sup>2</sup>). Le mât permet la collecte de la pluie au-dessus de la canopée et on mesure donc la pluie incidente qui n'est donc pas encore interceptée par le feuillage. L'entonnoir est connecté au pluviomètre à augets basculeurs (ARG100, Campbell Scientific, Shepshed, Leicestershire, UK) par un tuyau. Ce pluviomètre collecte les données pluviométriques toutes les dix secondes, un basculement d'auget correspondant à une lame précipitée de 0,18 mm (on tient compte du ratio surface réceptrice de l'entonnoir / surface du pluviomètre). Il permet également de déclencher l'acquisition des autres mesures par la centrale Campbell.

Le principe de l'acquisition des mesures est le suivant : dès qu'on a un battement d'auget, l'acquisition des mesures se fait toutes les 10s pendant une durée de 10min. A partir de 10min sans battement d'auget, on passe à une mesure toutes les 30s pendant 1h. S'il ne pleut toujours pas, l'acquisition se fait alors toutes les 5min pendant une durée de 6h et on passe enfin à une mesure toutes les 15min jusqu'à ce qu'il pleuve à nouveau. Ce système permet ainsi de limiter les données acquises.

Les cumuls des flux de drainage (lysimètres à mèches précédemment installés) et de ruissellement sont mesurés par des capteurs de pression couplés à des capteurs de températures, installés dans des bidons, qui mesurent le niveau de l'eau dans les bidons. Des étalonnages permettent ensuite de relier le niveau de l'eau dans le bidon avec son volume. Le flux de stemflow est mesuré selon le même principe après passage dans un partiteur qui ne stocke que 8 % du stemflow, le reste étant réinjecté le long du pseudo tronc. De plus, 25 tensiomètres sont installés à différentes profondeurs.

### **3. LES DONNEES EXPERIMENTALES DISPONIBLES**

Ce dispositif expérimental a été mis en place en 2004 par Martin (2004) pour appréhender le fonctionnement hydrologique global de la placette et les propriétés hydrodynamiques des andosols sous bananeraie ; l'acquisition des mesures a eu lieu du 28 juin au 15 septembre 2004. Heuzé (2005) a réutilisé le dispositif expérimental pour acquérir des données supplémentaires du 30 septembre au 28 octobre 2005 en ajoutant un dispositif vidéo afin de pouvoir observer directement les phénomènes du ruissellement. Malheureusement, pendant cette nouvelle période expérimentale, le ruissellement n'a pas pu être mesuré du fait de défaillances du matériel expérimental.

Pour répondre à notre problématique, nous avons choisi de n'étudier que les données de pluie et de ruissellement de l'année 2004 car le but de ce travail est d'analyser la variabilité du partage ruissellement – infiltration à l'échelle locale. Les données vidéo de 2005 nous ont toutefois permis d'observer certains phénomènes et d'élaborer des hypothèses concernant le fonctionnement hydrologique de la placette. Les données tensiométriques et lysimétriques n'ont pas été traitées dans ce mémoire.

## ***B. LE TRAITEMENT DES DONNEES DE 2004***

Pour pouvoir traiter les données relatives à la pluviométrie et au ruissellement, nous avons choisi un pas de temps d'une minute pour chaque valeur.

### **1. TRANSFORMATION DES DONNEES EN LAME D'EAU**

Pour pouvoir relier les précipitations au ruissellement, nous travaillons avec des cumuls. La lame précipitée, en hauteur d'eau, est obtenue en multipliant la lame d'eau déclenchant un basculement d'auget (0,18mm) par le nombre de battements d'augets comptés par minute. On obtient donc des intensités pluviométriques quantifiées en mm/min. En ce qui concerne le ruissellement, en utilisant les étalonnages effectués en 2004, nous avons transformé le niveau d'eau dans le bac en volume. Ce volume est ensuite divisé par la surface de placette qui est de 8,8 m<sup>2</sup>. On obtient donc une lame d'eau ruisselée cumulée sur l'ensemble de la placette.

L'incertitude est relativement faible en ce qui concerne les données pluviométriques car le système des augets est assez fiable. On l'estime à un battement d'auget par minute soit 0,18 mm/min. Par contre, la lame ruisselée est, quant à elle, moins précise. Elle est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de pression couplé à un thermomètre qui mesure le niveau dans le bac de ruissellement. Quand l'eau ruisselle dans le bac de ruissellement, elle provoque une perturbation de la surface et on aperçoit des oscillations du niveau d'eau dans le bac. Lorsque l'on transforme ensuite ce niveau mesuré du bac de ruissellement en hauteur d'eau ruisselée sur la totalité de la placette, ces oscillations sont conservées. Enfin, pour observer les hydrogrammes de crues, nous avons calculé le ruissellement instantané au pas de temps de la minute par différence de la lame ruisselée à la minute  $t+1$  et celle de la minute  $t$ . Dès lors, sur les hydrogrammes de crues, on observe que ces oscillations existent encore et qu'elles peuvent s'élever, en valeur absolue, jusqu'à 0,1mm pour 1min. Mais l'incertitude sur la mesure du ruissellement s'explique aussi par le couplage entre le capteur de pression et de température car les oscillations peuvent aussi être mesurées alors qu'il n'y pas de ruissellement. Des défaillances dans la précision du système de mesure de la température dans le bac peuvent donc expliquer les variations observées en dehors des périodes de crues. Finalement, ce dispositif implique donc une incertitude de la mesure de la lame ruisselée proportionnellement plus grande que sur celle de la lame précipitée, que l'on travaille avec des valeurs cumulées ou bien instantanées.

## **2. DELIMITATION DES EPISODES PLUVIEUX ET DES EVENEMENTS RUISSELANTS**

Pour pouvoir relier un épisode pluvieux à l'événement ruisselant correspondant, il est nécessaire de les définir avec précision. Dans ce travail, nous avons défini un épisode pluvieux comme une période durant laquelle il n'y a jamais plus de 15 min entre deux battements d'augets successifs. De ce fait, pour chaque épisode, il n'a pas plu au moins 15 min avant le début et 15 min après la fin de l'épisode. En outre, nous considérons que, compte tenu des conditions climatiques de la Guadeloupe, un épisode pluvieux doit entraîner une lame précipitée d'au moins 2mm. Afin de visualiser ces épisodes de pluies, nous avons délimité les événements observés en ne gardant que les données qui concernaient la période située entre 5 minutes avant le début de la pluie et 10 min après la fin de celle-ci. Nous avons donc durant cette période l'évolution des lames précipitée et ruisselée toutes les minutes.

En suivant ces critères de sélection pour les données de 2004, nous avons donc délimité 73 épisodes pluvieux entre le 02 juillet et le 15 septembre 2004. Ces épisodes n'amènent pas tous un ruissellement suffisant. De ce fait, nous avons décidé de n'étudier que les épisodes amenant au minimum une lame précipitée de 2mm et une lame ruisselée de 0,5mm. En effet, pour ces petits épisodes pluvieux, le volume ruisselé est trop faible par rapport à l'incertitude des mesures. Nous avons donc finalement retenu 41 événements ruisselants détaillés en Annexe 2.

### III. RESULTATS : VARIABILITE DU PARTAGE RUISSELLEMENT – INFILTRATION

#### A. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES DONNEES

Dans ce mémoire, on considère la placette comme une boîte noire dont on observe les entrées et les sorties. Pour cela, on considère que les entrées du système sont les pluies mesurées au dessus du couvert végétal et les sorties en sont le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration. L'évaporation et l'évapotranspiration sont considérées comme négligeables à l'échelle d'une pluie (quelques heures au plus). Les mesures n'ont lieu qu'au cours des événements pluvieux et l'on considère alors que les nuages limitent considérablement ces phénomènes. Les volumes précipités sont donc partagés entre infiltration et ruissellement à la surface du sol.

Le bilan hydrique par événement à l'échelle de la placette s'écrit alors :

$$P = R + I \quad \text{où } P, R \text{ et } I \text{ sont respectivement les lames précipitée, ruisselée et infiltrée (mm).}$$

#### 1. LA PLUVIOMETRIE

En Guadeloupe, la saison « sèche » a lieu pendant le carême (autour des mois de février et mars) tandis que la saison « des pluies », qui est également la saison cyclonique, se situe autour des mois d'octobre et novembre (Figure III-1). Les analyses concernant le partage ruissellement infiltration ont été étudiées sur les données mesurées durant l'expérience de l'été 2004. D'après la station météorologique du CIRAD de Neufchâteau, les précipitations mensuelles de juillet et d'août 2004 ont été respectivement de 368 mm et 300 mm, valeurs très proches des moyennes saisonnières calculées à partir des données pluviométriques de 1998 à 2005 sur cette même station (Figure III-1).

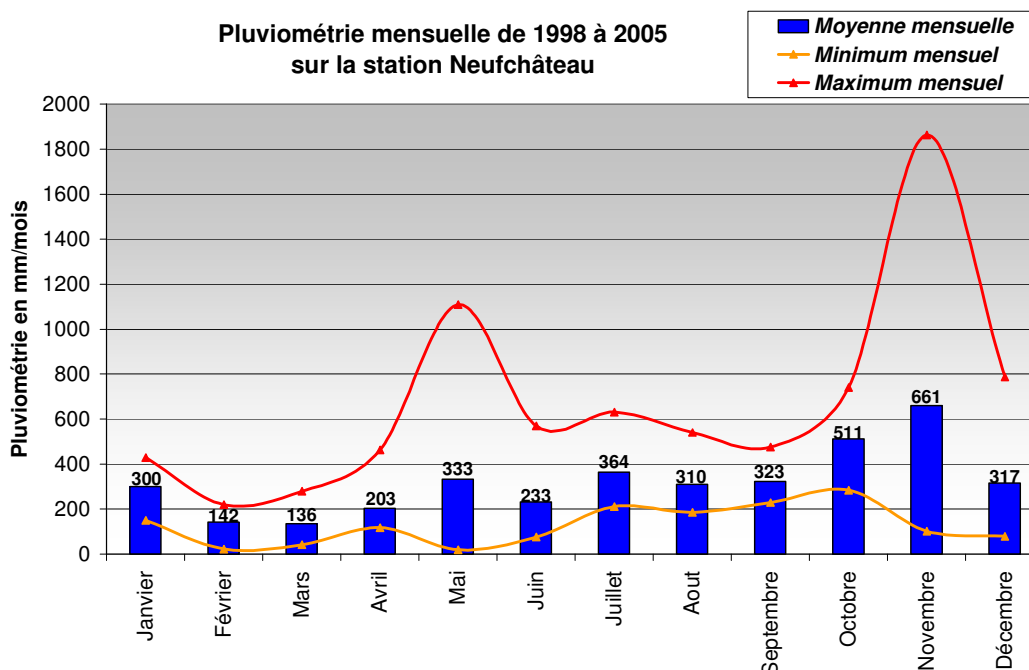


Figure III-1: Statistiques des précipitations mensuelles de 1998 à 2005 sur la station de Neufchâteau

La moyenne hebdomadaire précipitée sur cette période est de 70 mm, avec un minimum hebdomadaire de 14 mm dans la semaine du 15 au 22 août 2004. La semaine suivante, du 23 au 29 août 2004, on enregistre la plus forte hauteur précipitée en une semaine qui s'élève à 113 mm.

Par contre, les données vidéo de 2005 concernent des événements mesurés en octobre 2005, un mois particulièrement pluvieux. Il faut donc relativiser les résultats observés à partir des vidéos de 2005 lorsque l'on cherche à les transposer aux événements analysés de l'été 2004.

## 2. DESCRIPTION SYNTHETIQUE DES EVENEMENTS DE 2004

A partir des données de pluies et de ruissellement, nous avons extrait 41 événements ruisselants. La description de l'ensemble des événements ruisselants étudiés est disponible en Annexe 2 avec une fiche bilan qui détaille les analyses effectuées pour chacun des événements. Pour favoriser les analyses et leur comparaison, nous avons réalisé, pour chacun d'eux, un ensemble de 4 graphiques visualisés sur la Figure III-2 :

- Une synthèse permettant de décrire l'événement dans sa globalité,
- L'évolution, au cours de l'événement, des cumuls de pluies et de ruissellement ainsi que le hyétogramme,
- L'évolution du ruissellement cumulé en fonction de la pluie cumulée pendant l'épisode. Les pentes de cette courbe permettent de comprendre l'évolution continue du coefficient de ruissellement ( $CR=R/P$ ) au cours de l'événement ruisselant,
- Les hyétogramme et hydrogramme de l'événement. Pour le calcul du flux instantané de ruissellement, on a fait la différence entre la lame ruisselée au temps  $t+1$  et celle au temps  $t$ . Du fait des oscillations du niveau d'eau dans le bac de ruissellement, cette différence peut être négative ce qui explique une lame ruisselée instantanée qui peut parfois être « négative ».

### Événement ruisselant du 25/08/2004 à 01h38

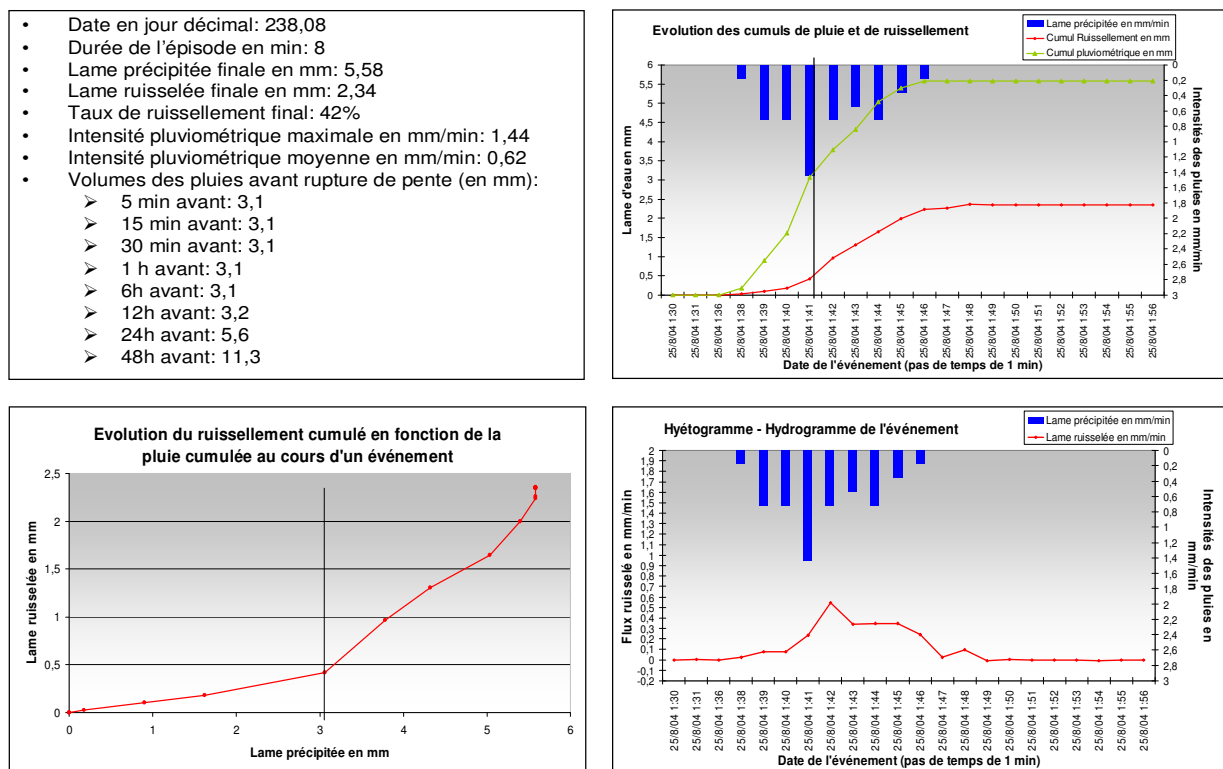


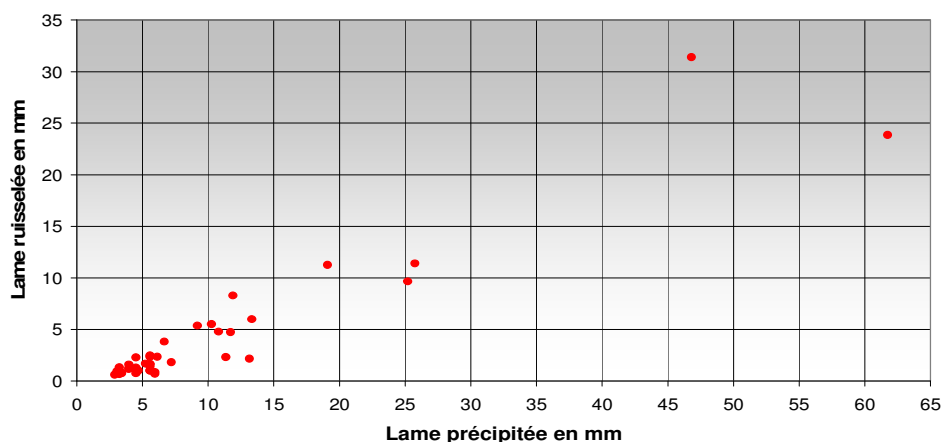
Figure III-2: Présentation de l'événement ruisselant du 25 août 2004 à 01h38

A partir des hydrogrammes de ruissellement, nous avons pu déterminer graphiquement que le temps de réponse de la placette (Annexe 1), qui correspond au temps moyen entre le pic de pluie et le pic de ruissellement, à l'échelle du bananier était de 1 min environ. Toutefois, il s'agit d'une estimation car nous fonctionnons dans ce travail avec un pas de temps d'une minute qui est proche de celui du temps de réponse estimé graphiquement.

D'autre part, lorsque l'on étudie globalement les CR finaux des 41 événements ruisselants (Figure III-3 et Tableau III-1), on remarque qu'ils sont assez variables (entre 13 et 70% à la fin des épisodes) mais relativement élevés puisque on mesure un CR moyen de 35% pour les 41 événements. Cette valeur est largement supérieure aux CR finaux mesurés à l'échelle de la parcelle où les CR

mesurés varient entre 5 et 11% (Cattan *et al.*, 2005). On pense pour expliquer cela que lorsque l'échelle spatiale augmente, le temps de transfert de la lame ruisselante en surface est parfois plus long que celui de la durée de l'épisode pluvieux ce qui se traduit inévitablement par une réinfiltration importante des volumes ruisselants avant l'arrivée à l'exutoire.

**Comparaison des lames ruisselées et précipitées des 41 événements ruisselants**



**Figure III-3: Comparaison des lames ruisselées et précipitées des 41 événements ruisselants étudiés**

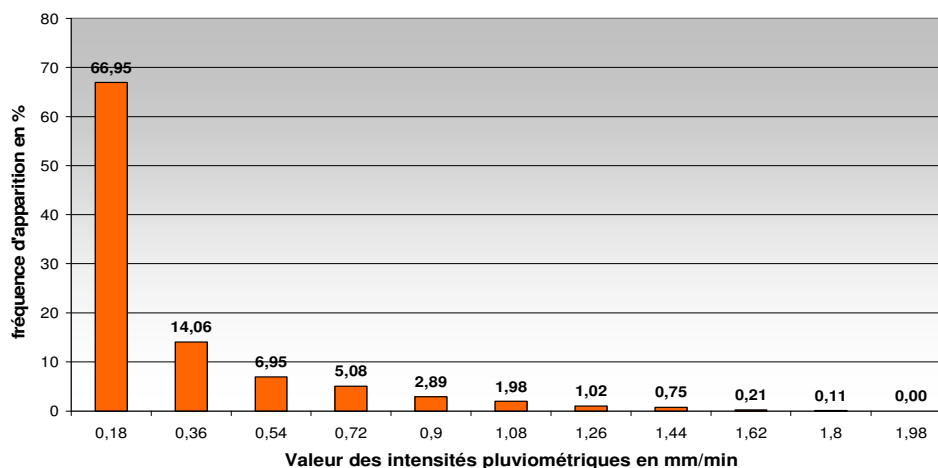
En outre, la lame précipitée est inférieure à 20 mm pour la plupart de ces épisodes, ce qui est en relation avec les normales saisonnières correspondant généralement au passage d'ondées tropicales.

	P (mm)	R (mm)	CR final = R / P (%)	Intensités P (mm/min)
<b>Moyenne</b>	9,8	4,0	34,6	34,6
<b>Minimum</b>	2,9	0,6	13,0	13,0
<b>Maximum</b>	61,7	31,4	70,0	70,0

**Tableau III-1: Gamme des volumes d'eau mis en jeu pour les 41 événements ruisselants étudiés**

Concernant les intensités pluviométriques, la Figure III-4 présente un histogramme de fréquence d'apparition (en %) des différentes intensités pluviométriques (en mm/min) observées. Cette répartition a été établie à partir de l'ensemble des données pluviométriques sur le pas de temps de la minute pendant la période d'observation (02/07/2004 au 15/09/2004). On remarque que les intensités qui dépassent 1 mm/min, soit 60 mm/h, représentent moins de 5% des intensités pluviométriques mesurées sur la période d'étude.

**Répartition des intensités de pluies (mm/min) pour les épisodes pluvieux sur la période du 02 juillet au 15 septembre 2004**



**Figure III-4: Histogramme de répartition des intensités pluviométriques sur la période d'étude**

### 3. ESTIMATION DU Ks

La compréhension des mécanismes du ruissellement passe par une estimation du partage ruissellement – infiltration. Un facteur primordial est donc la capacité d'infiltration de la surface du sol que nous caractérisons par la conductivité hydraulique à saturation Ks. En 2004, plusieurs méthodes ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des andosols de la placette expérimentale. Ces méthodes n'ont pas amené de résultats probants car leur variabilité était très importante, en corrélation avec la bibliographie qui estime ce Ks entre 20 et 350 mm/h. Néanmoins, les mesures établissaient tout de même une variation en fonction de l'état de surface de sols : les zones croûtées recouvertes de végétation ont un Ks variant entre 10 et 30 mm/h tandis que les zones laminées par les écoulements (aval du stemflow et inter rang) présentent un Ks de 220mm/h en moyenne mais avec une grande variabilité.

En août 2006, des mesures complémentaires par la méthode du double anneau ont été réalisées pour établir une valeur moyenne du Ks. Elles ont concernées les zones situées autour de la placette expérimentale dans la même parcelle Espérance Haut (Figure III-5). La variation du flux d'infiltration dans le temps provient du protocole expérimental utilisé pour la méthode du double anneau car la mesure a été effectuée avec une charge variable dans le temps (Annexe 1). En considérant une répartition spatiale uniforme et homogène des Ks sur la parcelle Espérance Haut, on peut estimer le Ks moyen de la placette expérimentale en lui attribuant une valeur proche du Ks moyen mesuré sur la parcelle. La charge d'eau variable dans le temps influence la valeur mesurée puisque la valeur de Ks diffère entre le début (charge élevée) et la fin (charge faible) de la mesure (intervalle d'environ 15% autour de la valeur moyenne obtenue par régression linéaire). En conditions naturelles, la charge à la surface du sol reste relativement faible donc il faut quelque peu sous-estimer la valeur moyenne mesurée de Ks. Dans ce travail, on retiendra donc une estimation de **Ks = 60 mm/h**.

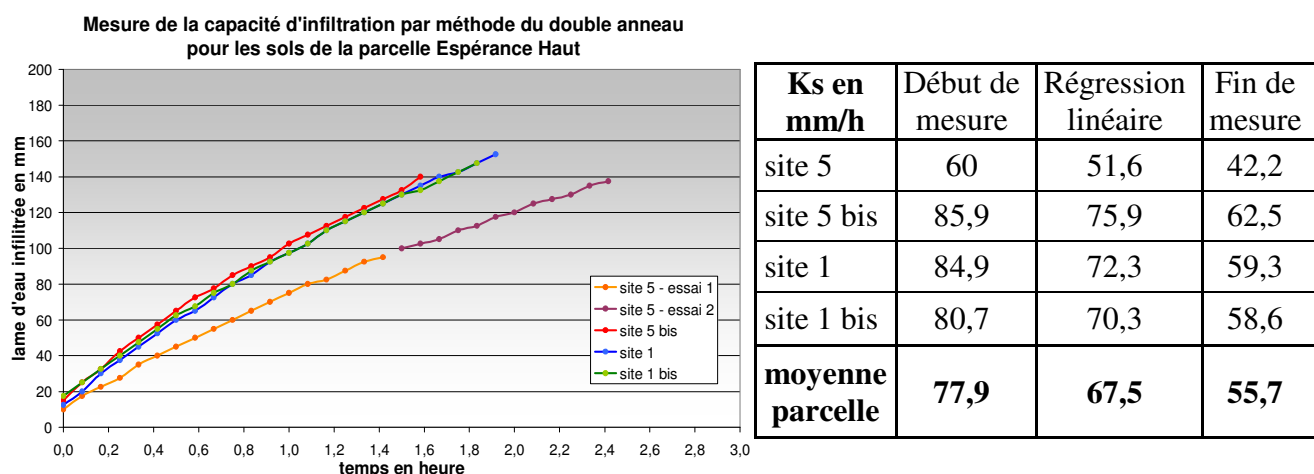


Figure III-5: Résultats des mesures de la capacité d'infiltration à saturation par la méthode du double anneau sur les sites situés autour de la placette expérimentale, Août 2006

Par ailleurs, dans le cadre d'une approche des transferts de soluté dans les andosols de cette parcelle Espérance Haut, une modélisation sous Hydrus2D<sup>®</sup> a été réalisée en juillet 2006 et elle a permis de calculer un Ks de 61 mm/h en moyenne sur la parcelle Espérance Haut. Cette valeur calculée confirme donc notre choix.

## B. ANALYSES DES VIDEOS DU RUISSELLEMENT (2005)

### 1. LES DONNEES VIDEO D'OCTOBRE 2005

Nous avons retenu 6 enregistrements qui nous semblaient particulièrement remarquables et qui synthétisaient l'ensemble des phénomènes observés sur toutes les vidéos disponibles. Une description de ces événements est disponible dans le Tableau III-2. On constate que les 6 événements retenus pour l'analyse vidéo présentent de fortes intensités pluviométriques et sont globalement plus pluvieux et

plus intenses que les événements ruisselants étudiés pour l'été 2004. Précisons toutefois que ces événements sont mesurés en octobre, un des mois les plus pluvieux de l'année (Figure III-1). Pour chacun des 6 événements observés, on a mis en relation le hyétogramme avec les phénomènes observés sur les vidéos. Le mode de représentation qui nous a semblé le plus simple était d'extraire certaines photos des moments clés du ruissellement observés sur les vidéos (Annexe 3).

Événement	Pluviométrie (mm)	Durée de la pluie (min)	Intensité maximale (mm/min)	Intensité moyenne (mm/min)
06/10/2005 à 16h22	22,86	47	1,26	0,49
13/10/2005 à 16h57	17,64	39	2,88	0,45
17/10/2005 à 12h33	22,68	19	2,52	1,19
20/10/2005 à 12h37	26,46	29	2,34	0,91
28/10/2005 à 14h30	4,86	8	1,98	0,61
31/10/2005 à 09h32	9,54	15	1,26	0,64
Moyenne	17,34	26,17	2,04	0,71









Tableau III-2: Description des 6 événements retenus pour l'analyse vidéo

## 2. DIFFERENTES PHASES DE RUISSÈLEMENT OBSERVEES

Lorsque l'on visionne les vidéos disponibles, on observe plusieurs grandes phases dans le fonctionnement du ruissellement à l'échelle de la placette. En effet, comme le montre la synthèse des 6 événements étudiés pour la vidéo (Annexe 3), on remarque que certaines zones contribuent particulièrement au ruissellement tandis que d'autres sont rarement saturées. Le schéma de la Figure III-6 permet de synthétiser l'ensemble des observations faites à partir des vidéos.

Schéma descriptif des phénomènes du ruissellement observés sur les vidéos

### Légende:

-  Faux tronc du bananier
-  Collerette
-  Surface projetée du feuillage du bananier
-  Caméra vidéo
-  Tôles d'isolement
-  Flacage des zones rapidement saturées
-  Premiers chemins d'eau à l'aval du stemflow et dans l'inter rang
-  Extension progressive des zones saturées contributives au ruissellement en cas d'augmentation de intensités de pluies

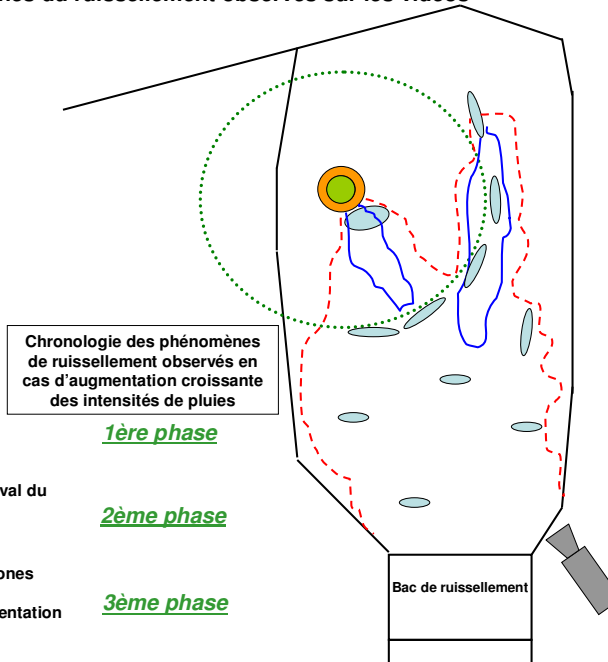


Figure III-6: Schéma descriptif général de la chronologie des phénomènes du ruissellement observés sur les vidéos en cas d'augmentation des intensités pluviométriques

Ainsi, on constate que l'on a tout d'abord une saturation des zones soumises à l'égouttage des feuilles du bananier avec la formation de flaques éparées. Ensuite, ces zones voient leur surface augmenter et des écoulements commencent à apparaître (1<sup>ère</sup> phase). Ce phénomène se fait en parallèle d'une saturation de la zone située à l'aval du pseudo tronc du bananier. Dès lors, le ruissellement commence réellement dans ces zones saturées et l'on constate la formation progressive de chemins d'eau à partir de ces zones saturées. Ceux-ci se situent notamment à l'aval du pseudo tronc



du bananier, dans la zone de l'inter rang et en milieu de placette, dans les zones de concentration de la pluie par effet d'égouttage à la périphérie de bananier (2<sup>ème</sup> phase). Si les intensités continuent d'augmenter, ces zones voient leur surface s'agrandir et le ruissellement généralisé sur la placette apparaît (3<sup>ème</sup> phase). La placette peut même devenir inondée sauf en certaines zones protégées par l'effet parapluie des feuilles du bananier qui ne contribuent donc quasiment jamais au ruissellement de la placette. Ensuite, si les intensités de pluies diminuent, on remarque une réinfiltration des zones saturées en corrélation avec la diminution des surfaces contributives au ruissellement. Certaines zones où l'on a une surconcentration de la pluie mettent plus de temps à se réinfiltrer. Ce sont les zones qui sont également rapidement saturées. Elles sont situées en périphérie du couvert végétal du bananier (zones d'égouttage) et juste à l'aval du stemflow. De ce fait, l'intensité pluviométrique réellement incidente au niveau de ces zones reste importante par rapport à la capacité d'infiltration des sols et le flacage met plus de temps à disparaître. Lorsque les intensités pluviométriques chutent fortement, la réinfiltration a lieu sur l'ensemble de la placette jusqu'à la disparition de l'ensemble des zones saturées.

### 3. LES CHANGEMENTS DE PHASE SONT EN RELATION AVEC LES INTENSITES PLUVIOMETRIQUES

Pour pouvoir caractériser la relation entre les phénomènes de ruissellement observés et les intensités pluviométriques qui en sont à l'origine, nous avons distingué deux zones : les zones rapidement saturées du fait d'une surconcentration des pluies (égouttage, stemflow, inter rang) et qui contribuent massivement au ruissellement et le reste de la placette. Si l'on met en relation les phénomènes observés sur les vidéos avec les intensités pluviométriques, on voit que les faibles intensités ( $I \leq 0,54$  mm/min) ne font que saturer ces zones sur concentrées. Par contre, lorsque les intensités sont supérieures ou égales à 0,9 mm/min, la plupart des zones de la placette se saturent et le ruissellement généralisé de la placette commence avec en particulier l'apparition de chemins d'eau partant des zones sur concentrées. Si les intensités augmentent encore, l'ensemble de la placette contribue au ruissellement jusqu'à inondation potentielle de toute la placette.

Dès lors, si l'on considère que la capacité d'infiltration des sols de la placette est homogène et que les intensités pluviométriques mesurées sont homogènes à celles observées sur toute la placette, on estime donc graphiquement que la conductivité hydraulique à saturation doit être comprise entre 0,5 et 0,8 mm/min, soit une valeur de Ks moyen de l'ordre de 30 à 50 mm/h ce qui n'est pas la valeur que l'on a mesuré. L'événement du 31 octobre 2005 (Figure III-7 et Annexe 3) illustre assez bien cette observation.

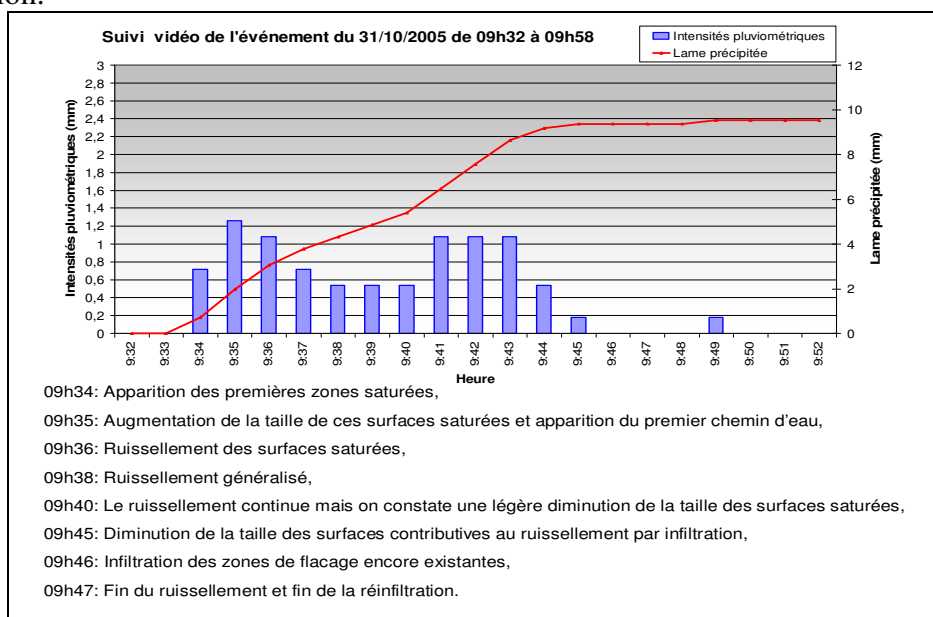


Figure III-7: Description des phénomènes observés sur la vidéo de l'événement du 31/10/2005 (Annexe 3)



En effet, on constate par exemple sur la Figure III-7 que même quand les intensités diminuent à 0,54 mm/min, le ruissellement (observé et non mesuré) continue et les intensités sont suffisantes pour maintenir une saturation de la surface des zones sur concentrées. Par contre, pour les zones plus difficilement activées, on observe une légère réinfiltration qui se manifeste par une légère diminution de leurs surfaces. De ce fait, la redistribution de la pluie par le couvert végétal du bananier expliquerait qu'à une intensité incidente limite mesurée (au dessus du couvert) de l'ordre de 0,6 mm/min, certaines zones de concentration des pluies soient saturées tandis que d'autres absorbent les pluies sans faire apparaître de ruissellement.

Quoi qu'il en soit, on observe visuellement sur l'ensemble des vidéos (Annexe 3) que le flacage, qui représente le début du ruissellement, semble apparaître sur la placette pour des intensités pluviométriques supérieures à 0,72 mm/min soit 43 mm/h. Par contre, notons que le dispositif ne permet d'analyser que des phénomènes très visibles et donc de grande ampleur.

A partir de ces observations vidéo du fonctionnement hydrologique de la placette, on note que **le stemflow et l'égouttage ont un rôle privilégié sur la genèse du ruissellement**. En effet, le feuillage du bananier provoque une redistribution de la pluie incidente et particulièrement une concentration des volumes de pluies au niveau de ces zones. Cet excès d'eau sature donc le sol pour des intensités pluviométriques incidentes qui ne devraient pas entraîner de ruissellement. Mais la concentration de la pluie par ce couvert végétal génère des intensités réelles localement fortes qui entraînent le phénomène de flacage puis le déclenchement des écoulements. Le rôle du stemflow et de l'égouttage, et plus généralement de la redistribution de la pluie par le bananier, est donc primordial dans la compréhension des phénomènes du partage ruissellement / infiltration à l'échelle locale car il amène une hétérogénéité des surfaces contributives au ruissellement.

De plus, on constate visuellement des effets de seuil pour le ruissellement qui sont liés aux intensités pluvieuses au dessus du bananier. Le ruissellement semble être de type hortonien par dépassement de la capacité d'infiltration du sol. Pourtant, ces observations de la genèse du ruissellement ne nous permettent pas de déterminer précisément le seuil de la capacité d'infiltration puisque l'on ne connaît pas la répartition spatiale des intensités pluviométriques réellement incidentes au sol. Ainsi, si l'on néglige ces phénomènes de redistribution, on estime une valeur de  $K_s$  (30 à 50mm/h) inférieure à la valeur de  $K_s$  mesuré (60 mm/h)

## ***C. LES COEFFICIENTS DE RUISELLEMENT (CR)***

A partir des données continues des événements ruisselants de 2004 (Annexe 2), nous avons étudié l'évolution chronologique des CR au cours de chaque événement.

### **1. LES CR EVOLUENT DANS LE TEMPS**

L'évolution de la lame ruisselée en fonction de la lame précipitée (Annexe 2) permet de calculer l'évolution continue du CR des événements. Nous avons remarqué que la pente de ces graphiques, qui estime le CR à un instant donné, variait considérablement dans le temps. Par une méthode graphique, nous avons donc délimité les périodes de pente semblable. Avec une méthode de régressions linéaires, nous avons calculé la pente moyenne de ces différentes phases et on a donc l'estimation des différents CR au cours de l'événement. Cette détermination graphique a toujours été confortée par une estimation du coefficient de corrélation. Globalement, on considère qu'une corrélation est satisfaisante lorsque qu'elle dépasse la valeur de 0,90 et bonne au-delà de 0,95. Cette opération a été menée pour les 41 événements ruisselants de 2004 étudiés. Pour chaque événement, on détermine les périodes de pente identique et donc les phases avec un CR constant. Ce nombre de différentes valeurs de pentes consécutives peut varier entre 1 (pour l'événement du 04 septembre 2004) et 9 (pour l'événement du 27 août 2004). Plus généralement, on observe que la plupart des événements (plus de 80%) ne présentent que 2 ou 3 pentes successives.

La Figure III-2 nous présente ce graphique  $R = f(P)$  pour l'événement du 25 août 2004 à 01h38. On y voit nettement une rupture de pente à 01h41, 3 minutes après le début de la pluie pour cet

événement qui dure au total 9 minutes. Pour cet événement du 25 août 2004 à 01h38 par exemple, on distingue une première période avec une pente de 0,14 ( $R^2=0,9904$ ) puis une autre avec une pente de 0,76 ( $R^2=0,9785$ ). Le CR est donc de 14% pendant 3 minutes puis passe à 76% pendant les 6 minutes restantes de l'événement. On suppose donc que cette évolution des CR met en évidence les différentes phases du ruissellement évoquées lors de l'observation des vidéos.

En outre, nous avons constaté en visualisant ces graphiques  $R=f(P)$  pour tous les événements que leur pente variait dans le temps avec souvent une 1<sup>ère</sup> pente faible (autour de 0,15) puis une rupture qui amène une 2<sup>ème</sup> pente plus élevée (autour de 0,60) à l'instar de l'événement du 25 août 2004 à 01h38 (Figure III-2). Ensuite, il peut y avoir d'autres ruptures, généralement pour les événements présentant de forts volumes de pluies. Ces 3<sup>èmes</sup> pentes peuvent soit augmenter fortement autour de 1,00 soit diminuer à nouveau pour repasser à un faible taux (autour de 0,2). Ainsi, pour des événements de fortes pluies et de longue durée, qui sont souvent intermittents, on peut avoir plusieurs successions de pentes faibles et de pentes fortes. C'est par exemple le cas de l'événement du 28 juillet 2004 à 11h23 visible sur la Figure III-8, qui montre une succession de 6 CR : 9%, 50%, 20%, 84%, 20% et enfin 55% parallèlement aux intermittences des intensités de pluie de l'événement.

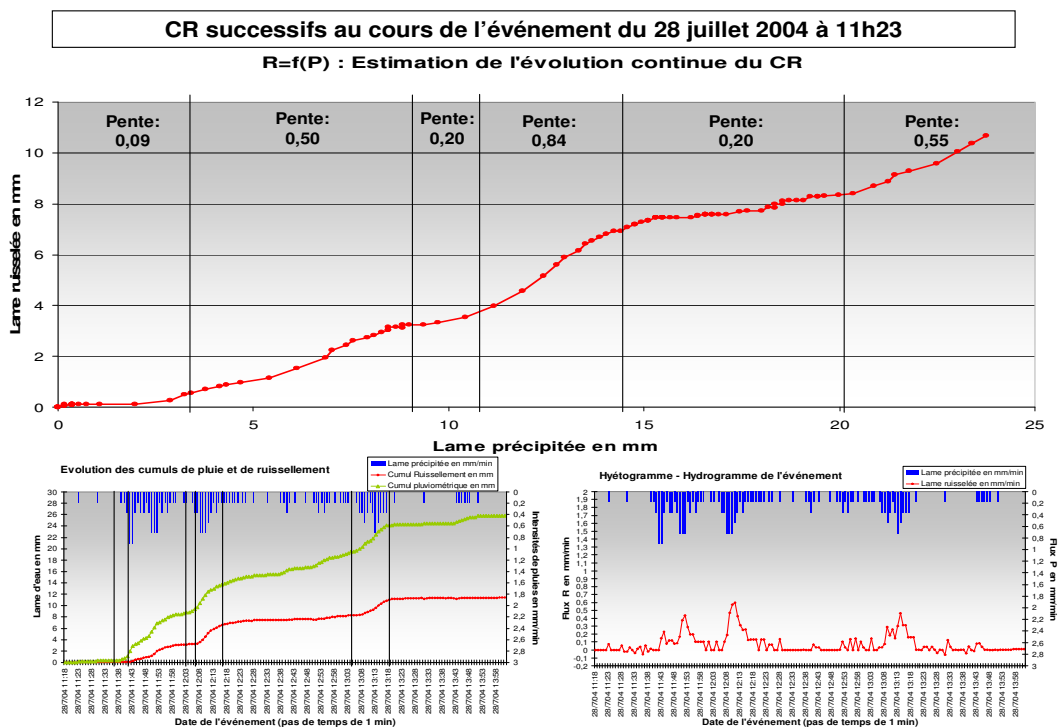
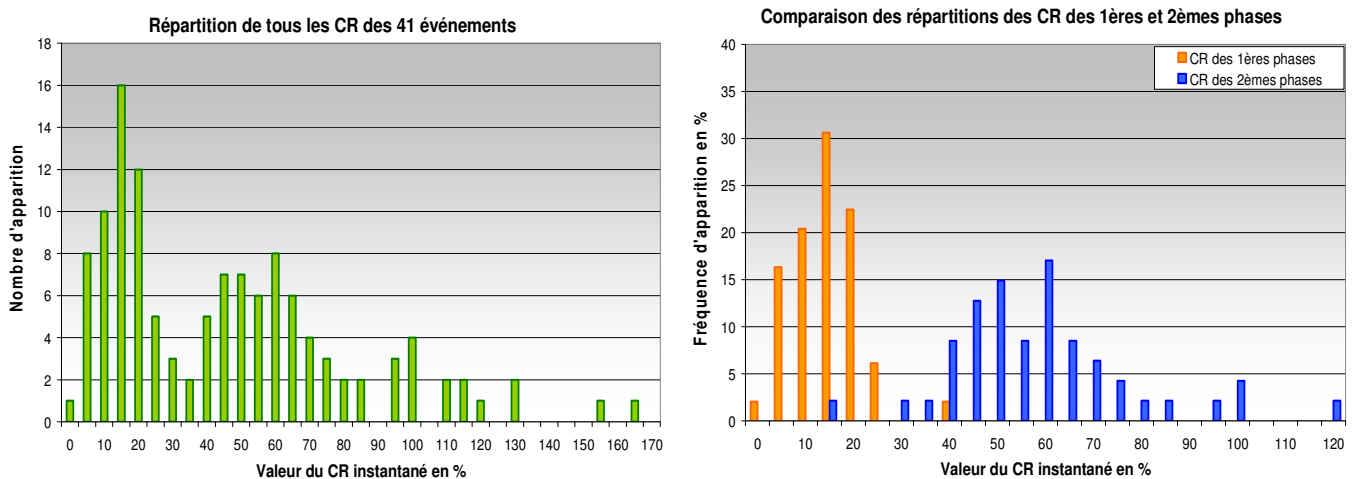


Figure III-8: Visualisation des variations de taux de ruissellement pour l'événement du 28 août 2004 à 11h23

Par ailleurs, la Figure III-9 montre que la répartition de ces CR est de type bimodale. On distingue donc une série de CR centrée sur 15% puis une autre série avec des valeurs comprises entre 40 et 70%. Par observation graphique (Annexe 2), on remarque que le CR de la 1<sup>ère</sup> phase (début de l'événement) avoisine toujours 5 à 25%. Ensuite, une 2<sup>ème</sup> phase apparaît, caractérisée par une rupture de pente relativement nette, et les CR passent alors entre 40 et 70%. Eventuellement, il peut y avoir une 3<sup>ème</sup> phase correspondant encore à un changement de CR qui peut être soit encore plus important (autour de 100%) soit revenir à une valeur plus faible (autour de 20 à 30%). Si ce 3<sup>ème</sup> CR est supérieur à celui de la 2<sup>ème</sup> phase (pente autour de 1,00 mais avec une grande variabilité), cela peut s'expliquer par l'influence du temps de réponse de la placette. En effet, l'influence du temps de transferts des écoulements amène parfois un dépassement du CR instantané qui devient supérieur à 100% : la lame ruisselée est alors plus forte que la lame précipitée. La pluie peut ainsi cesser alors que le ruissellement lui continue d'où cette élévation « anormale » du CR. Ce phénomène est une spécificité du traitement continu de l'évolution du CR.

De ces variations instantanées du CR, on déduit qu'il existe plusieurs phases dans le ruissellement qui pourraient expliquer ces observations.



**Figure III-9: Répartition des valeurs des pentes des graphiques  $R=f(P)$  pour les 41 événements ruisselants de 2004 (A gauche : toutes les valeurs de pente ; A droite : seulement les 1ères et 2èmes pentes)**

Ainsi, en relation avec les observations des phénomènes observés grâce au dispositif vidéo, on peut émettre certaines hypothèses relatant le fonctionnement du système sol bananier :

- Au début de l'événement (1<sup>ère</sup> phase), les CR sont faibles et correspondent à une phase de saturation de la placette. Seules certaines surfaces sur alimentées en pluie sont saturées et génèrent du ruissellement.
- Ensuite (2<sup>ème</sup> phase), l'augmentation du CR est en relation avec une augmentation de la taille de ces surfaces saturées qui amènent un ruissellement important sur la placette.
- Enfin, on peut éventuellement observer d'autres phases pour les événements intermittents qui ne correspondent probablement qu'aux variations de taille des surfaces contributives en relation avec les variations des intensités pluviométriques.

Les phases de CR constant observées sur les graphiques  $R=f(P)$  des événements s'expliqueraient donc par une variation de la taille des surfaces contributives du ruissellement qui sont les surfaces saturées par les pluies. Les intensités pluviométriques (spatialement variables du fait de la redistribution) sont donc a priori responsables de l'état de saturation variable de la placette et donc de la variation spatiale des surfaces contributives au ruissellement. Si ces hypothèses étaient vérifiées, on aurait donc une relation étroite entre les changements de phase et les intensités pluviométriques mesurées car ce sont elles qui semblent a priori régir le partage ruissellement - infiltration à cette échelle.

Pour pouvoir déterminer les facteurs qui influencent ces changements de phase du ruissellement à l'échelle de la placette, on s'intéresse plus particulièrement aux ruptures de pente sur les graphiques  $R=f(P)$ . La généralisation de nos analyses passe par une étude plus approfondie des ruptures de pente entre les deux premières phases car elles sont observées pour l'ensemble des événements. De ce fait, dans la suite de ce chapitre, on étudiera exclusivement les deux premières phases observées en analysant particulièrement la première rupture de pente (changement entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> phase) mais par observations, on sait que les conclusions liées à ce changement dans la dynamique de ruissellement sont très probablement les mêmes pour les autres ruptures de pentes.

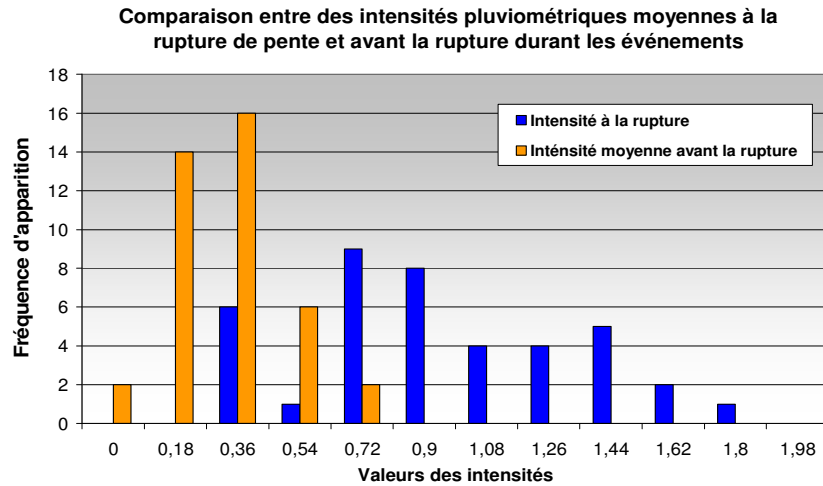
## 2. LES INTENSITES PLUVIOMETRIQUES DETERMINENT DES CHANGEMENTS DANS LA DYNAMIQUE DU RUISSELLEMENT

### a) LES FORTES INTENSITES SONT RESPONSABLES DE LA RUPTURE DE PENTE

Lorsque l'on regarde attentivement les intensités pluviométriques autour de la première rupture de pente, on remarque que l'on a souvent une forte intensité dans la minute précédant cette rupture de pente. En effet, les intensités pluviométriques moyennes à la rupture s'élèvent à 0,95 mm/min tandis

qu'avant la rupture, les intensités ne sont en moyenne que de 0,30mm/min. Si pour chaque événement on calcule l'intensité pluviométrique moyenne avant la rupture (du début de l'épisode jusqu'à la rupture) et qu'on la compare avec l'intensité à la rupture, on remarque une répartition très inégale des intensités (Figure III-10). C'est donc une augmentation de l'intensité qui engendre un changement brusque du CR et donc le passage de la 1<sup>ère</sup> à la 2<sup>ème</sup> phase du ruissellement. Par observation des graphiques  $R=f(P)$ , on observe que ce phénomène est également valable pour toutes les autres ruptures de pente où l'on passe d'une phase à un faible CR (autour de 15%) à un fort CR (supérieur à 40%).

Ainsi, on peut conclure qu'une augmentation importante de l'intensité pluviométrique amène une rupture de pente dans le graphique  $R=f(P)$  et suppose donc une modification du comportement hydrologique de la placette.

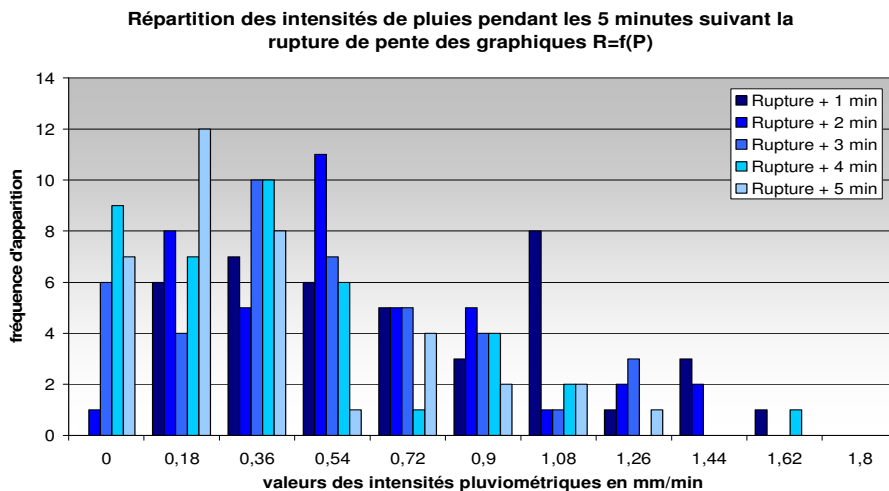


**Figure III-10: Comparaison des intensités pluviométriques à la rupture et avant la rupture**

Par contre, on ne met pas en évidence qu'une baisse des intensités permet d'expliquer le passage d'une phase à fort taux à une phase à faible taux de ruissellement car lorsque les intensités baissent, le taux de ruissellement instantané semble rester constant.

### **b) LA PLUIE QUI TOMBE APRES LA RUPTURE RUISSELLE**

La Figure III-11 représente la répartition des intensités pluviométriques pour les 5 minutes suivant la première rupture de pente. Pendant ces 5 premières minutes de la 2<sup>ème</sup> phase, on sait que l'on est en situation de CR fort et donc qu'une grande partie de la placette est saturée et participe au ruissellement. Pourtant cette figure nous montre bien que les intensités ne sont pas particulièrement fortes dans les minutes qui suivent la rupture (répartition « pseudo gaussienne ») ce qui signifie qu'en début de 2<sup>ème</sup> phase du ruissellement, même les faibles intensités engendrent un fort CR.



**Figure III-11: Répartition des intensités pluviométriques pendant les 5 min suivant la rupture**

De ce fait, on en déduit que toute la pluie qui tombe sur les surfaces contributives au ruissellement s'écoule. En effet, les intensités étant faibles, on ne peut avoir une augmentation de la taille des surfaces contributives qui auraient même tendance à diminuer. Mais le CR restant identiques, on en conclut que l'on a atteint, sur certaines zones, le point de saturation du sol donc toute la pluie qui tombe sur ces zones ruisselle.

Il faut toutefois relativiser cette conclusion qui est ici vraie car la majorité de nos événements sont uniformes et non intermittents. En effet, lorsque l'on observe les hyétogrammes – hydrogrammes de l'Annexe 2 ou les vidéos de l'Annexe 3, on remarque que lorsque les intensités diminuent en dessous de la capacité d'infiltration, on constate une réinfiltration massive qui se traduit par une diminution des CR. Si par contre la pluie s'arrête, le ruissellement également (en négligeant le temps de transfert) et le CR ne varie pas et reste constant.

Pour synthétiser toutes ces conclusions concernant le lien entre les intensités pluviométriques et les variations du CR, la Figure III-12 nous montre les différentes répartitions de toutes les valeurs d'intensités pluviométriques mesurées autour de la première rupture de pente. En effet, on peut voir qu'avant la première rupture de pente (entre le début de la pluie et la première rupture de pente ou bien 8 minutes avant la première rupture si la durée entre le début de la pluie et la rupture est supérieure à 8 min), les intensités ne dépassent que rarement la valeur de 0,72mm/min (seulement 10% des valeurs). Ce n'est pas le cas par contre à la minute de la rupture de pente (Figure III-10) car les intensités sont pour la plupart au dessus de ce seuil de 0,72 mm/min (plus de 80% des valeurs). C'est donc bien les intensités de pluies qui gouvernent l'augmentation du taux de ruissellement. Par ailleurs, cette figure nous permet également de mettre en évidence que les intensités après la rupture sont réparties de manière « pseudo gaussienne ». Ainsi, que les intensités soient faibles ou pas, après la rupture, le ruissellement continu et le taux de ruissellement ne varie pas : ce qui précipite ruisselle.

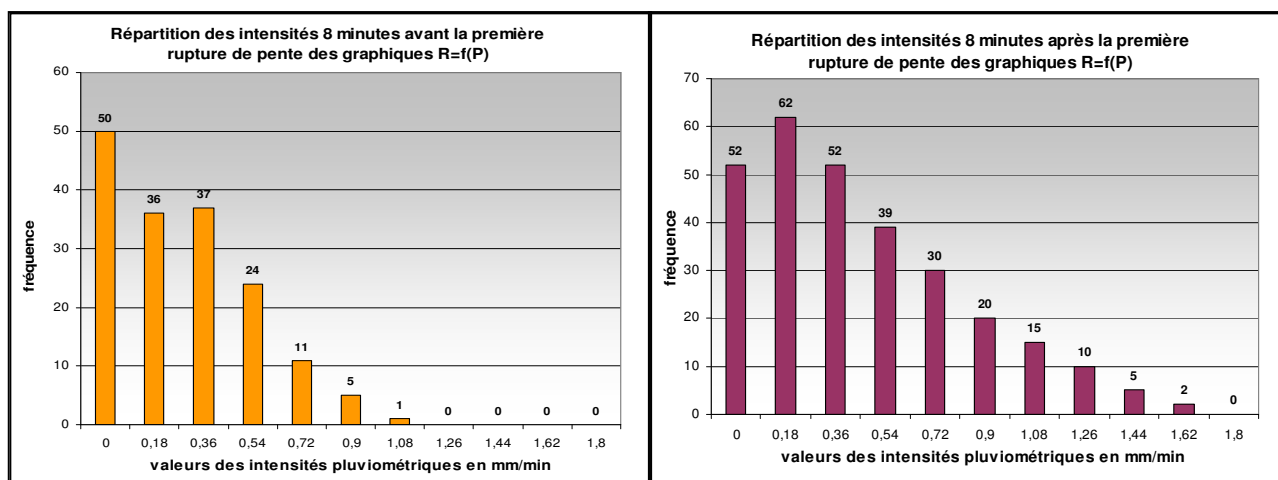


Figure III-12: Répartition des intensités pluviométriques avant et après la 1<sup>ère</sup> rupture des événements ruisselants

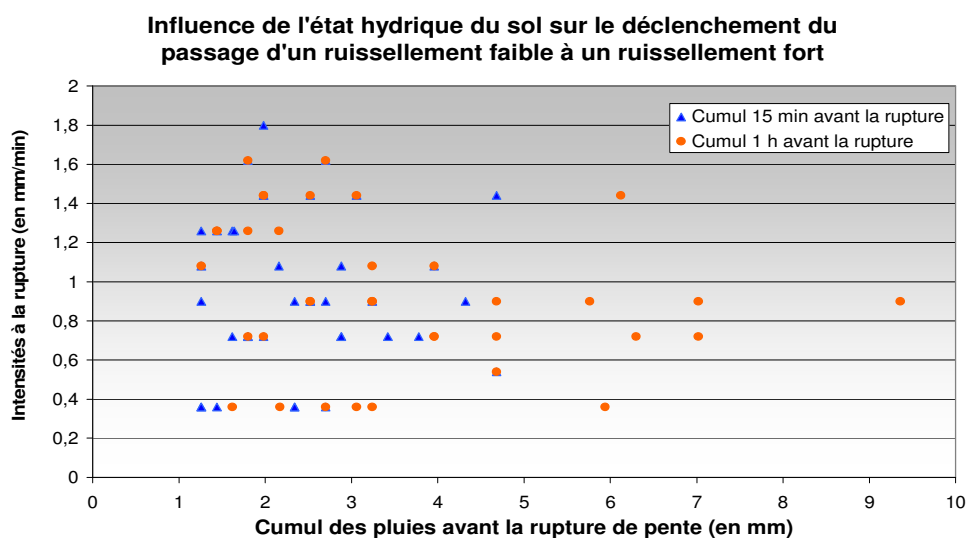
### 3. LES EFFETS DES ETATS HYDRIQUES INITIAUX DE LA PLACETTE NE SONT PAS MIS EN EVIDENCE

L'expérience de 2004 nous fournit des données tensiométriques de la placette (cf. Figure II-3). Néanmoins, vu la disposition spatiale des tensiomètres et leur variation de profondeur, ils ne permettent pas d'estimer correctement l'état hydrique de la placette au début de chaque événement. Nous avons donc décidé pour cela d'utiliser le cumul pluviométrique antécédents comme indicateur de l'état hydrique initial des sols de la placette. On calcule le cumul pluviométrique pour certains temps caractéristiques avant le début de l'événement et avant la première rupture de pente. On a donc calculé le cumul des pluies tombées pendant les 5 minutes précédents la première rupture de pente. Nous avons répété ce calcul pour les durées suivantes : 15 min, 30 min, 1h, 6h, 12h, 24h et 48h. Ainsi, on peut connaître pour chacun des événements le volume des pluies avant la première rupture de pente. Ces calculs ont été synthétisés pour chacun des épisodes étudiés en Annexe 2.

Lorsque l'on compare, pour tous les événements, le cumul pluviométrique (entre le temps  $t$  et la première rupture de pente) et les intensités qui déclenchent cette rupture de pente, on ne remarque pas de lien direct comme le montre la Figure III-13. L'hypothèse était en effet que :

- lorsque le sol était humide du fait d'un fort cumul pluviométrique précédent la rupture, une intensité plus faible était capable de déclencher la rupture de pente, c'est-à-dire la mise en place du ruissellement fort sur la placette,
- lorsque le sol était sec, il faudrait théoriquement une plus forte intensité pour pouvoir saturer la surface du sol.

Cette hypothèse de fonctionnement n'a pas été mise en évidence. Et ce quelles que soient les durées choisies pour le calcul du cumul de pluies et que l'on considère l'intensité à la rupture sur un pas de temps d'1, de 2 ou de 5 minutes. L'état hydrique initial du sol ne semble donc pas jouer un rôle essentiel sur le déclenchement des mécanismes de ruissellement intense (CR élevé).



**Figure III-13: Influence de l'état hydrique du sol sur le déclenchement d'un fort taux de ruissellement**

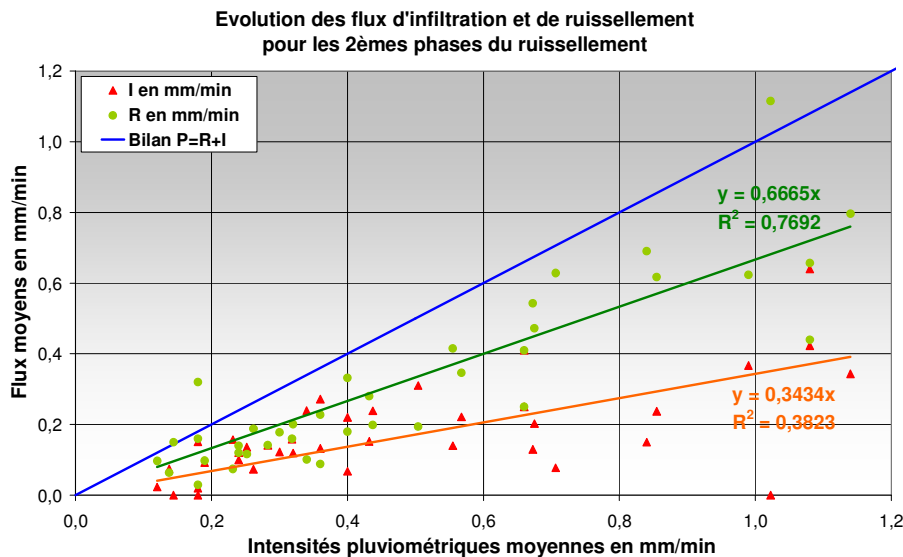
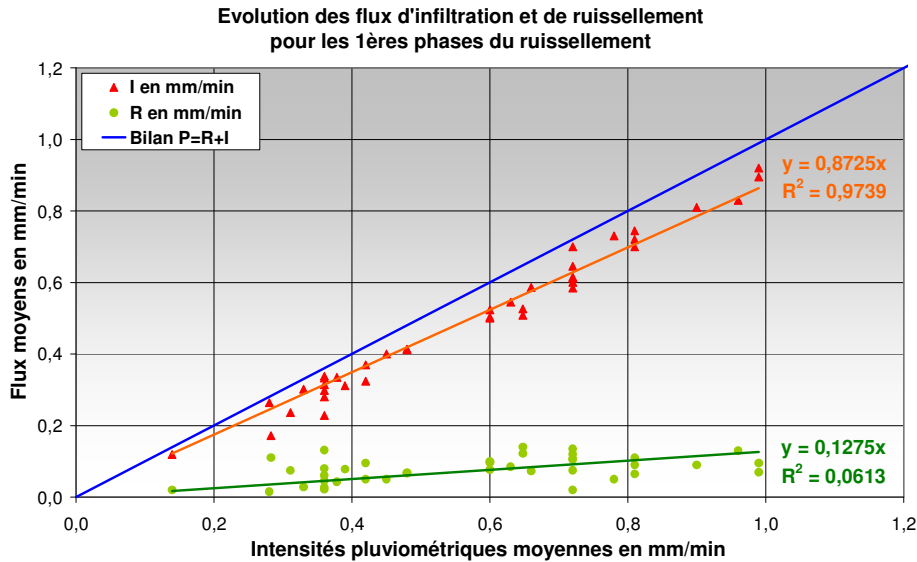
En outre, nous avons montré que ces cumuls pluviométriques précédant les épisodes étudiés n'avaient pas non plus d'influence sur le CR final de ces événements ruisselants.

## ***D.LES FLUX D'INFILTRATION***

Pour caractériser l'infiltration, nous avons effectué un bilan hydrologique sur la surface des sols de la placette. Selon nos hypothèses, les apports d'eau ne se font que par les précipitations tandis que les sorties se partagent entre infiltration et ruissellement. Pour chacun des événements, nous avons calculé l'infiltration instantanée en faisant la différence entre la lame précipitée et la lame ruisselée pendant une phase de CR constant, pour chacun des événements. En effet, on ne peut caractériser correctement l'infiltration instantanée en faisant cette différence à chaque pas de temps car le temps de transfert de la placette aurait pour conséquence d'obtenir parfois des volumes infiltrés négatifs. L'intérêt est donc ici de pouvoir comparer l'infiltration pendant les différentes phases du ruissellement ; celle avec un faible CR (autour de 15%) et celle avec un fort CR (autour de 60%). Pour cela, nous introduisons une nouvelle variable qui est la durée de la phase considérée. Ainsi, on peut calculer un flux d'infiltration moyen pendant cette phase de CR constant à partir des volumes précipité et ruisselé. La Figure III-14 (respectivement Figure III-15) montre la relation entre l'intensité pluviométrique et les flux d'infiltration et de ruissellement durant la 1<sup>ère</sup> phase du ruissellement (respectivement la 2<sup>ème</sup> phase).

Pour la 1<sup>ère</sup> phase du ruissellement caractérisé par un CR relativement faible (autour de 15%), le flux d'infiltration moyen est élevé quand les intensités pluviométriques moyennes sont également élevées. Par contre, le flux de ruissellement semble rester constant et quasiment nul quelle que soit la valeur de l'intensité pluviométrique moyenne. C'est donc l'infiltration qui joue le rôle prépondérant dans le partage ruissellement – infiltration du début de l'événement. On en conclut qu'on se situe bien

dans une phase de saturation des sols car la plupart des surfaces infiltrent et ne sont donc pas saturées. De plus, le ruissellement reste très faible et quasiment constant ce qui prouve que pendant cette phase de saturation, très peu de surfaces participent au ruissellement. Les seules surfaces contributives au ruissellement sont des zones saturées malgré les faibles intensités pluviométriques moyennes. Il est probable qu'il s'agisse des zones suralimentées en eau du fait de la redistribution des pluies c'est-à-dire les zones de flacage observées sur les vidéos.



La Figure III-15 présente le partage infiltration – ruissellement pendant la 2<sup>ème</sup> phase du ruissellement (CR fort autour de 60%). On remarque que le flux d'infiltration augmente très légèrement avec les intensités pluviométriques tandis que celui du ruissellement augmente deux fois plus rapidement. C'est donc le ruissellement qui domine le partage de la pluie car les flux de ruissellement sont toujours plus importants que ceux de l'infiltration. Notons que lorsque les intensités pluviométriques moyennes augmentent, il est fort probable que la taille des surfaces contributives augmente également ce qui explique l'augmentation forte des flux de ruissellement, ce qui est confirmé par l'analyse des vidéos (Annexe 3).

En outre, en comparant ces deux phases chronologiques du ruissellement, on observe que le flux d'infiltration est plus bas en phase de ruissellement intense qu'en phase préliminaire de saturation de la placette. Pour interpréter cette observation, comme il n'y a pas de changement de répartition spatiale de la pluie en fonction des intensités pluviométriques car la redistribution de la pluie est



proportionnellement homogène pour toutes les pluies, il faut considérer une diminution des flux d'infiltration dans le temps d'un événement sur les zones ruisselantes. En effet, lors du ruissellement intense en phase 2, la plupart des zones de la placette sont saturées et donc les pluies tombent directement sur des zones d'écoulements. Ainsi, le flux ruisselé augmente proportionnellement plus rapidement que les flux d'infiltration qui doivent être quasiment constants puisque l'on a atteint le seuil du  $K_s$ . Si les flux d'infiltration augmentent quand même, cela est sûrement dû au fait que lorsque les intensités moyennes sont fortes, des zones protégées reçoivent quand même des stocks d'eau qui s'infiltreront car au niveau de ces zones, le  $K_s$  n'est pas encore atteint.

Précisons qu'il faut éviter de comparer les valeurs des Figure III-14 et Figure III-15 car les flux sont obtenus en faisant le rapport du volume infiltré ou ruisselé sur la durée de la phase considérée. Mais la durée de la 1<sup>ère</sup> phase est généralement plus courte (5 min en moyenne) que la 2<sup>ème</sup> phase (8 min en moyenne) ce qui a tendance rendre l'effet tampon de la moyenne plus important dans la 2<sup>ème</sup> phase que dans la 1<sup>ère</sup>.

La Figure III-16 confirme cette interprétation de la baisse du flux d'infiltration entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> phase du ruissellement et d'une manière plus générale quand le CR augmente. La 1<sup>ère</sup> phase montre des flux d'infiltration très variables car ils dépendent bien évidemment des intensités pluviométriques. La 2<sup>ème</sup> phase par contre présente des flux d'infiltration quasiment constants mais plus faibles que ceux de la 1<sup>ère</sup> phase car le ruissellement est fort et c'est donc lui qui assume les variations d'intensités pluviométriques. Dans le cas des flux de ruissellement, c'est le contraire : dans la 1<sup>ère</sup> phase, le ruissellement est très limité et quasiment constant tandis que pour la 2<sup>ème</sup> phase, il est élevé et variable car c'est lui qui régit le partage ruissellement – infiltration. Par ailleurs, on remarque que le flux d'infiltration moyen globale sur la placette reste bien toujours inférieur au  $K_s$  de 60 mm/h soit 1mm/min.

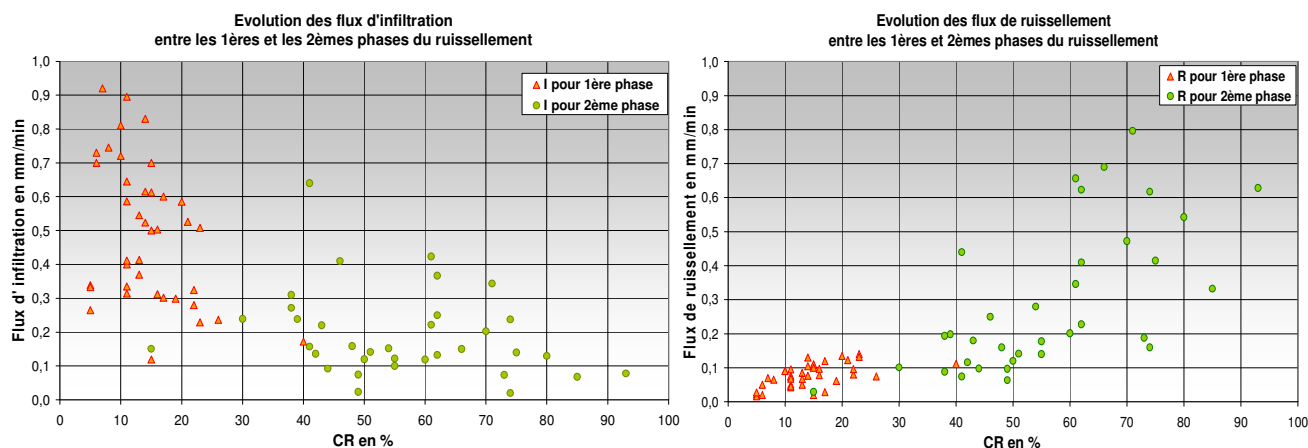


Figure III-16: Répartition des flux d'infiltration (à gauche) et de ruissellement (à droite) pendant les 1ères et 2èmes phases du ruissellement

## ***E. DISCUSSION ET CONCLUSIONS***

### **1. PLUSIEURS PHASES DE RUISSELLEMENT GOUVERNEES PAR LES INTENSITES PLUVIOMETRIQUES**

Les observations vidéo nous ont permis d'établir qu'il existe différents stades chronologiques dans le ruissellement. Tout d'abord, on observe visuellement un phénomène de flacage sur certaines zones qui subissent des apports massifs d'eau de pluie du fait de la redistribution spatiale du feuillage du bananier : ce sont les zones suralimentées qui se satureront (cf. Figure III-6). Ces zones sont généralement situées au niveau de l'égouttage des feuilles et au niveau du pseudo tronc du bananier (stemflow). Ensuite, apparaissent les premiers chemins d'eau à l'aval du stemflow et dans l'inter rang. Ce sont les premières ondes de ruissellement qui se déclenchent quand les intensités augmentent suffisamment pour déclencher des écoulements par dépassement de la capacité d'infiltration. Ces



zones ruissellent tandis que le reste de la parcelle absorbe les pluies par infiltration sans qu'on observe de flacage. Si les intensités augmentent encore, la taille de ces zones, appelées surfaces contributives ou participatives au ruissellement, augmente jusqu'au ruissellement généralisé de la placette. Quand les intensités diminuent, on observe une réinfiltration sur l'ensemble des zones d'écoulements de la placette mais les premières zones saturées sont celles qui mettent le plus de temps à se réinfiltrer.

Parallèlement, l'observation des graphiques  $R=f(P)$  (où  $R$  est la lame ruisselée cumulée et  $P$  la lame précipitée cumulée) de chaque événement montre une évolution systématique du CR. Il est d'abord de l'ordre de 15% puis augmente brutalement vers un taux de 60% environ. On a établi que cette rupture était provoquée par une augmentation de l'intensité pluviométrique. Dès lors, on a pu en déduire plusieurs hypothèses de fonctionnement dans la chronologie de l'événement ruisselant :

- Phase 1 (CR=15%) : Au début de l'événement, quand les intensités pluviométriques sont faibles, on a une saturation rapide des zones suralimentées qui ruissellent. Ces intensités ne sont cependant pas suffisantes pour déclencher le ruissellement sur l'ensemble de la placette.
- Phase 2 (CR=60%) : Ensuite, quand les intensités augmentent, il y a d'abord saturation d'autres zones moins alimentées qui commencent alors à ruisseler puis apparition des chemins d'écoulements qui font brusquement augmenter le CR. Si les intensités augmentent encore, on a une croissance de la taille de ces zones contributives au ruissellement et le CR peut soit rester constant soit augmenter selon l'augmentation des intensités pluviométriques.

Les variations du CR s'expliquent donc par une variation de la taille des surfaces contributives qui sont directement liées aux variations des intensités pluviométriques mesurées et à leur redistribution spatiale par le bananier. Ainsi, ce suivi continu du CR pour chacun des 41 événements de 2004 permet une description fine du fonctionnement hydrologique du système sol bananier à l'échelle locale de la placette.

## **2. PREDOMINANCE DU RUISELLEMENT HORTONIEN**

La rupture de pente observée sur les graphiques d'évolution des CR (Annexe 2) et sa liaison avec les intensités pluviométriques prouve que la phase à CR élevé se fait par la mise en place d'écoulements déclenchés par un dépassement local de la capacité d'infiltration de ces zones saturées. On en conclut donc que le ruissellement est de type hortonien qui amène des écoulements surfaciques par dépassement temporaire de la capacité d'infiltration au niveau de la surface des sols de la placette du fait des intensités pluviométriques.

Les observations vidéo et leurs relations avec les intensités pluviométriques mesurées nous permettent d'élaborer certains critères quant au déclenchement du ruissellement. On estime ainsi que les écoulements des zones suralimentées débutent à partir d'intensités de pluies supérieures à 0,6mm/min soit environ 35 mm/h. Mais le phénomène de flacage et donc de saturation commence pour des intensités pluviométriques plus faibles. Par contre, la saturation des autres zones de la placette n'a lieu que pour des intensités de pluies bien supérieures qu'il est difficile de quantifier à partir des observations vidéo. On ne peut donc pas déterminer exactement les seuils de déclenchement du ruissellement hortonien sur chacune des zones de la placette.

Les mesures complémentaires de la capacité d'infiltration à saturation sur la parcelle, effectuées en août 2006, donnent une valeur de  $K_s$  de 60 mm/h (Figure III-5). On aurait donc du flacage sur les zones suralimentées par dépassement de  $K_s$  pour des intensités globales des pluies plus faibles que 60mm/h (1mm/min). Le ruissellement de ces zones suralimentées qui commence apparemment en dessous de ce seuil montre donc l'impact prédominant de la redistribution de la pluie par le bananier qui doit concentrer les pluies suffisamment pour dépasser le  $K_s$ . La difficulté d'interprétation est essentiellement liée à cette redistribution qui amène des intensités spatialement variables à la surface du sol de la placette.

### 3. MAIS DES INTERROGATIONS VIS-A-VIS DE CE MODELE DE FONCTIONNEMENT

#### a) L'INFLUENCE DES ETATS HYDRIQUES

Les résultats obtenus à partir des données de 2004 ne mettent pas en évidence l'influence des états hydriques initiaux. Cette observation amène donc des interrogations quant au ruissellement de type hortonien uniquement qui se fait par dépassement de la capacité d'infiltration des sols. Mais les mesures de capacité d'infiltration effectuées en 2006 donne un  $K_s$  de 60 mm/h ce qui est comparable avec les données bibliographiques disponibles sur les andosols. De ce fait, l'influence des cumuls pluviométriques précédant la pluie est rare au-delà d'un pas de temps de quelques minutes car tout peut s'infiltrer. Une hypothèse serait donc que les andosols absorbent tellement rapidement que les pluies cumulées avant l'événement n'influencent pas le comportement de la placette en situation de crue. Les pluies précédant l'événement ne rendent que le sol plus humide mais celui-ci n'étant jamais en état de déficit hydrique (du fait du climat qui amène des pluies régulières et abondantes), son potentiel de sorption reste faible ; les pluies antécédentes ne contribuent donc pas réellement à la saturation de la surface du sol de la placette car le sol se désature très rapidement.

#### b) QUELLES HYPOTHESES DE FONCTIONNEMENT

Comme nous l'avons montré au III.C.2, le ruissellement au cours de la 2<sup>ème</sup> phase de ruissellement (CR élevé) continue pour des pluies d'intensité très variables : il semblerait donc qu'il faille des intensités plus faibles pour diminuer CR que celles nécessaires à son départ. De plus, le flux d'infiltration semble diminuer dans le temps de l'événement (chapitre III.D). Compte tenu de ces résultats, il est clair que le fonctionnement du ruissellement à l'échelle de la placette n'est pas homogène spatialement. Plusieurs hypothèses de fonctionnement hydrologique du partage ruissellement – infiltration peuvent être émises pour expliquer ces particularités spatiales :

- **Hypothèse 1** : Le  $K_s$  est homogène pour toute la placette et les intensités de pluies à la surface du sol sont variables dans l'espace car le feuillage opère une redistribution intense des pluies. Dès lors, si le ruissellement continue malgré des intensités plus faibles que la capacité d'infiltration, cela est seulement dû au temps de réponse pour le transfert de ces écoulements.

- **Hypothèse 2** : Le  $K_s$  n'est pas homogène sur la placette et il existe donc plusieurs  $K_s$  différents suivant les zones de la placette. La variation des surfaces contributives serait donc en relation directe avec la capacité d'infiltration variable dans l'espace. Néanmoins, il faut également que les intensités faibles qui maintiennent le ruissellement soient dans la gamme du temps de transferts.

- **Hypothèse 3** : Il existe 2 horizons dans le sol avec chacun un  $K_s$  distincts. Un horizon de surface A de  $K_{sA}$  et un horizon de sub-surface B, limitant, de  $K_{sB}$  tel que  $K_{sB} < K_{sA}$ . Cette limite expliquerait donc que le ruissellement peut continuer malgré une baisse des intensités car l'horizon B limite l'infiltration et crée une zone saturée en surface. En effet, la genèse du ruissellement se ferait pour  $I > K_{sA}$ , puis dès que le front d'infiltration atteint l'horizon B, le ruissellement continu pour  $I > K_{sB}$ . Une limite de ce modèle est que les états hydriques devraient alors jouer un rôle prépondérant ce qui n'est en relation avec nos observations donc la saturation de l'horizon A est peu probable.

- **Hypothèse 4** : La capacité d'infiltration diminue avec le temps sur la durée d'un événement soit en raison d'une diminution du gradient de potentiel mais ici les potentiels sont déjà élevés et on n'a pas mis en évidence l'influence des états hydriques du sol ; soit par un phénomène d'encroûtement (remaniement des agrégats par les écoulements) mais qui se répéterait au cours de chaque événement et non comme un processus continu au cours d'une saison de culture.

L'hypothèse 1 est la plus probable puisqu'elle rassemble l'ensemble des données mises en évidence et est en accord avec les observations vidéo. C'est donc le facteur redistribution de la pluie par le bananier qui est responsable de la variabilité du ruissellement à l'échelle de la placette. Celui-ci est principalement de type hortonien par dépassement du  $K_s$  probablement homogène sur la placette.

## **IV. MODELISATION DES PHENOMENES DE RUISSELLEMENT**

Pour valider notre hypothèse concernant le fonctionnement hydrologique du système sol – bananier à l'échelle de la placette et plus particulièrement le partage ruissellement – infiltration, nous avons cherché à mettre en place un modèle simple qui permette de mettre en évidence l'influence de la redistribution des pluies par le feuillage du bananier.

### ***A.DESCRPTION, OBJECTIFS ET LIMITES DU MODELE***

#### **1. PRINCIPES ET HYPOTHESES : UN MODELE SIMPLE ET ROBUSTE**

A partir de l'hypothèse 1 du chapitre III.E.3.b), nous élaborons un modèle qui tient compte de l'influence de la redistribution de la pluie par le bananier. Dès lors, ce modèle a pour but de valider ces hypothèses de fonctionnement. Il n'a pas vocation à être un modèle pointu et prédictif mais simplement de confirmer certaines hypothèses de fonctionnement. De ce fait, nous avons préféré un modèle simple mais suffisamment robuste pour appréhender la variabilité des paramètres de ce système sol bananier (climat, propriétés hydrodynamiques des andosols, structure foliaire des bananiers, etc.). Le modèle appliqué à la placette est basé sur l'interface du modèle MHYDAS\_UH (Modélisation HYdrologique Distribuée des Agro Systèmes - calage à l'échelle des Unités Hydrologiques) développé par Roger Moussa (UMR LISAH, Décembre 2000). Il repose sur les hypothèses suivantes :

- Le modèle est de type modélisation pluie débit avec une fonction de production et une fonction de transfert ;
- La fonction de production avec ou sans redistribution est représentative d'un ruissellement de type hortonien : le ruissellement est la partie de la pluie supérieure au seuil d'intensité du Ksat moyen. Dans le cas du modèle avec redistribution, on applique une fonction préalable de redistribution de la pluie par le couvert végétal. Enfin, on y ajoute la fonction de transfert ;
- L'entrée est un hyétogramme de pluie et la sortie un hydrogramme de ruissellement simulé que l'on compare à celui mesuré sur le terrain ;
- La placette est caractérisée par des propriétés hydrodynamiques moyennes et spatialement homogènes ;
- Les conditions initiales sont celles de l'état de saturation, il n'y a donc pas de variation de la capacité d'infiltration au cours du temps ;
- Le ruissellement est de type hortonien par dépassement de la capacité d'infiltration que l'on considère homogène sur l'ensemble de la placette.

Au final, on compare les hydrogrammes de crues calculés par le modèle avec ceux que l'on a mesuré. Certains indices nous permettent d'estimer la précision du calcul et donc du modèle. En comparant les hydrogrammes obtenus sur sol nu (modèle non redistribué) et sur sol couvert (modèle redistribué), on évalue l'impact de la redistribution de la pluie par le bananier.

#### **2. UNE FONCTION DE REDISTRIBUTION DE LA PLUIE**

Pour notre modèle, nous avons ajouté une fonction préalable de redistribution de la pluie par le couvert végétal (Charlier J.B., Desbois P., Cattani P., 2006). En effet, nous savons que le feuillage du bananier redistribue de manière importante les pluies au sol. Comme nous l'avons observées sur les

vidéos (Annexe 3), on distingue plusieurs zones sur la placette (Figure I-1): le stemflow avec une concentration très importante (intensités pouvant être jusqu'à 30 fois supérieures à celles de la pluie incidente), une zone sous concentrée du fait de l'effet parapluie, une zone sur concentrée par le phénomène d'égouttage et quelques zones neutres ne faisant pas l'objet d'interception par le couvert végétal. Il est néanmoins très difficile de quantifier précisément les surfaces de ces différentes zones et leur rapport de transmission. Pour cette raison, et en accord avec le modèle utilisé par Cattani *et al.* (2006), nous avons choisi de ne distinguer que deux zones distinctes : une zone « sur concentrée » qui englobe les zones de fortes intensités pluviométriques (stemflow, égouttage) et une zone « sous concentrée » qui présente des intensités plus faibles que celles mesurées au dessus du couvert.

La placette de surface  $S$  reçoit une pluie incidente d'intensité  $P$  et de volume  $V$  pendant un pas de temps donné. On considère alors que cette placette est séparée en 2 zones distinctes mais considérée comme homogène en leur sein: une zone « sur concentrée »  $A$  de surface  $S_A$  qui reçoit un flux réel d'intensité  $P_A > P$  (de volume  $V_A$ ) et une zone « sous concentrée »  $B$  de surface  $S_B$  qui reçoit un flux réel d'intensité  $P_B < P$  (de volume  $V_B$ ). On définit ensuite les facteurs de répartition  $\alpha$  et  $\beta$  par les équations suivantes:

- $\alpha = P_A / P$  avec  $\alpha > 1$
- $\beta = S_A / S$  avec  $0 < \beta < 1$

On obtient alors finalement:

Pour les surfaces :  $S_A = \beta.S$  et  $S_B = (1 - \beta).S$ .

Concernant la répartition des pluies, on a :

$$P_A = \alpha.P \text{ et } P_B = \frac{V_B}{S_B} = \frac{(V - V_A)}{S_B} = \frac{(P.S - P_A.S_A)}{S_B} = \frac{(P.S - \alpha.P.S_A)}{S_B} = \frac{P.(S - \alpha.\beta.S)}{S.(1 - \beta)} = P \cdot \frac{(1 - \alpha.\beta)}{(1 - \beta)}$$

### 3. LES FONCTIONS DE PRODUCTION ET DE TRANSFERT DU MODELE

Pour la suite du modèle, nous avons choisi une fonction de production simple de ruissellement hortonien par dépassement de la capacité d'infiltration à saturation en considérant que ce  $K_s$  est homogène sur l'ensemble de la placette et que le sol était en permanence en état de saturation. Cette hypothèse est forte mais simplificatrice au vu des résultats du chapitre consacré aux intensités d'infiltration (III.C.3) car le rôle des états hydriques initiaux n'a pas été mis en évidence dans le déclenchement du ruissellement intense. C'est cette fonction de production qui permet de déterminer le partage infiltration – ruissellement des volumes précipités. Le ruissellement ne se produit que lorsque les intensités pluviométriques dépassent la valeur du  $K_s$ .

En notant  $R$  l'intensité du ruissellement sur la placette, on a donc la lame ruisselée finale pour le bilan hydrique de la placette :  $R = \frac{(R_A.S_A + R_B.S_B)}{S} = \frac{(R_A.\beta.S + R_B.(1 - \beta).S)}{S} = R_A.\beta + R_B.(1 - \beta)$

$$\text{Avec } \begin{cases} R_A = P_A - K_{sat} & \text{si } P_A > K_s ; R_A = 0 \text{ sinon} \\ R_B = P_B - K_{sat} & \text{si } P_B > K_s ; R_B = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Enfin, la fonction de transfert est de type onde diffusante (Moussa et Bocquillon, 1996) et détaillée par Chahinian *et al.* (2006). Cette fonction de transfert permet de diffuser et de transférer les volumes ruisselants vers l'exutoire de la placette (Figure IV-1). Ici, son influence sur les résultats du modèle est assez modérée car la placette ne mesure qu'à peine 5 m de longueur.

La Figure IV-1 synthétise le fonctionnement du modèle et plus particulièrement celui de la fonction de redistribution. Le flux ruisselé au niveau de l'exutoire est donc fonction du volume ruisselé déterminé par la fonction de production et des paramètres hydrauliques du modèle.

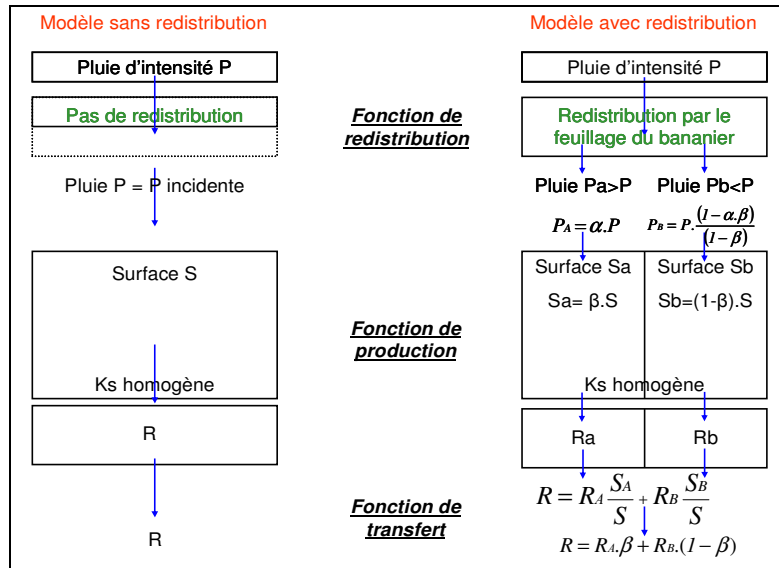


Figure IV-1: Schéma synthétique de fonctionnement du modèle

## 4. STRATEGIE DE MODELISATION

Nous avons utilisé dans cette modélisation les données mesurées lors de la campagne de mesure de 2004. Mais nous avons choisi de n'étudier que les 30 événements dont la lame d'eau précipitée au final était supérieure à 4 mm. En effet, la réponse hydrologique de la placette pour les 11 petits épisodes pluvieux est souvent faible mais surtout trop variable par rapport à la sensibilité du couplage des capteurs de pression et de température qui mesurent cette lame ruisselée. En effet, sur les graphiques Pluie Débit (Annexe 2), on remarque bien que pour cette gamme d'épisodes, la réponse de la placette sur le ruissellement n'est pas suffisante pour une approche optimale des mécanismes du partage ruissellement - infiltration. Ainsi, sur les 41 événements étudiés, nous en retenons seulement 30 dont la liste est disponible en Annexe 4.

Par ailleurs, sur ces 30 événements, nous avons choisi d'en utiliser 10 pour le calage du modèle et 20 pour la validation. Dans le but de caler le modèle sur une gamme représentative de la variabilité des épisodes, nous avons trié les épisodes par lame précipitée croissante et avons retenu un événement sur 3 pour le calage en y incluant les valeurs extrêmes.

## B. PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE

### 1. LE CHOIX DES PARAMETRES DU MODELE

Certains paramètres de notre modèle ne sont pas à caler puisqu'ils ont été mesurés ou bien sont directement attachés aux mesures sur la placette. Ainsi, comme on l'a vu au chapitre III.A.3, en ce qui concerne la fonction de production, on retient une valeur de 60 mm/h pour la capacité d'infiltration moyenne à saturation sur la placette. Cette valeur est en accord avec les données mesurées, modélisées sur le terrain même si l'on sait qu'elle est assez variable pour les andosols. De même, pour la fonction de transfert par exemple, on a choisi une distance à l'exutoire de 3m qui correspond à la distance moyenne à l'exutoire. Les paramètres les plus difficiles à estimer sont les paramètres liés à la fonction de redistribution de la pluie par le feuillage du bananier. Selon Cattani (2006), on estime les valeurs suivantes :  $\alpha=3,5$  et  $\beta=0,3$ . On choisit donc généralement de mettre comme paramètres des valeurs mesurées. Cela nous permet de baser les résultats de notre modélisation sur des mesures plutôt que sur un calage de critères abstraits. Les seuls paramètres qu'il faut réellement caler sont les critères de la fonction de transfert qui influencent l'allure de l'hydrogramme de crue : la célérité et la diffusivité de l'onde diffusante (Chahinian *et al.*, 2006).

## 2. LE CALAGE DU MODELE

La phase de calage consiste à trouver les valeurs des paramètres du modèle qui minimisent l'erreur de modélisation. Dans notre modèle, elle ne concerne que la diffusivité et la célérité. Nous avons donc procédé à un calage manuel en fixant une valeur de diffusivité pour déterminer la valeur optimale de célérité. Dès lors, en prenant cette valeur optimale de célérité, on recherche la valeur optimale de diffusivité. Cette opération a été renouvelée en fixant en premier lieu la célérité. On observe que les valeurs obtenues sont identiques ce qui valide notre procédure de calage.

Pour juger de la pertinence du calage, le critère utilisé pour les procédures de calage collectif (pour tous les 10 événements) est le coefficient de Nash and Sutcliffe (1970) lorsque que le calage est réalisé sur N événements. Ce critère de Nash et Sutcliffe a été sélectionné car c'est un critère global de mesure de l'erreur entre les résultats calculés et mesurés communément utilisé dans les modélisations hydrologiques appliquées. On aurait pu utiliser une analyse multicritères : erreurs sur les volumes et sur le débit de pointe. Cette analyse aurait été plus précise mais elle a été abandonnée faute de temps.

On choisit donc ce critère pour notre analyse de sensibilité. Le critère de Nash prend ses valeurs entre  $-\infty$  et 1. Un critère de 1 signifie un ajustement parfait entre données mesurées et observées. Un critère négatif indique que le modèle donne de moins bons résultats que l'utilisation de la moyenne de l'échantillon. Globalement, on considère que lorsque le critère de Nash est supérieur à 0.7, la modélisation explique assez bien le fonctionnement hydrologique du système. Il est calculé par l'équation suivante :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (Q_{mes_{ij}} - Q_{cal_{ij}})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (Q_{mes_{ij}} - \bar{Q})^2}$$

- Où
- NS : critère global de Nash-Sutcliffe souvent ramené en pourcentage ;
  - i : un indice représentant le numéro de l'événement ( $1 \leq i \leq N$ ) ;
  - j : un indice représentant la minute dans l'événement i ( $1 \leq j \leq n_i$ ) ;
  - N : le nombre total d'événements utilisés pour le calage ;
  - $n_i$  : la durée total de l'événement i (en min) ;
  - $Q_{mes_{ij}}$  : Flux de ruissellement mesuré à la minute j de l'événement i (en mm/min);
  - $Q_{cal_{ij}}$  : Flux de ruissellement calculé à la minute j de l'événement i (en mm/min);
  - $\bar{Q}$  : Moyenne de tous les flux de ruissellement mesurés pour tous les événements.

Pendant la phase du calage, on compare donc les critères de Nash globaux obtenus pour les 10 premiers événements. Pour notre calage, nous avons calculé le critère de Nash sous forme de pourcentage. La Figure IV-2 nous montre le résultat de la modélisation de l'événement 7 du 04/07/2004 à 12h05, les autres résultats sont en Annexe 4. On peut voir que en absence de fonction de redistribution, rien ne ruisselle car les intensités restent inférieures au  $K_s$  (60mm/h soit 1 mm/min). Par contre, le couvert permet lui de déclencher du ruissellement pour des intensités beaucoup plus faibles du fait de la concentration des volumes de pluies en certaines zones qui ruissellent. Au final, on se rapproche beaucoup plus des phénomènes observés et mesurés et l'erreur du modèle reste relativement faible.

Pour connaître la sensibilité de notre modèle aux variations des différents paramètres ( $K_s$ ,  $\alpha$  et  $\beta$ ), on calcule l'influence globale, sur les 10 événements du calage, d'une variation de l'un d'eux de plus ou moins 20% sur le critère de Nash-Sutcliffe. Cette valeur de variation de 20% a été choisie au vu de l'incertitude sur les valeurs mesurées du  $K_s$  mais également à partir de l'estimation des paramètres de redistribution  $\alpha$  et  $\beta$ . Sur le Tableau IV-1, on voit que le modèle de production en l'absence de redistribution est particulièrement sensible avec une variation du  $K_s$  ce qui est normal vu que la fonction est basée sur un dépassement de  $K_s$ . Ce paramètre qui semble donc être le plus important n'influence que très peu les résultats du modèle appliqué avec la redistribution, ce qui

prouve que le modèle est robuste. Pour ce qui est de la sensibilité aux paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ , elle reste très faible puisqu'une variation de 20% de l'un de ces paramètres n'engendre qu'une variation de 10 points maximum sur le critère de Nash. Ainsi, si on applique une variation 20% à l'un des 3 paramètres, le critère de Nash reste supérieur à 70% ce qui valide la robustesse de ce modèle dans le cas du « sol couvert ». Il est donc évident que l'influence de la redistribution de la pluie joue un rôle primordial sur le ruissellement à l'échelle de la placette car le modèle sans redistribution ne ruisselle quasiment jamais et toujours largement en dessous du CR mesuré.

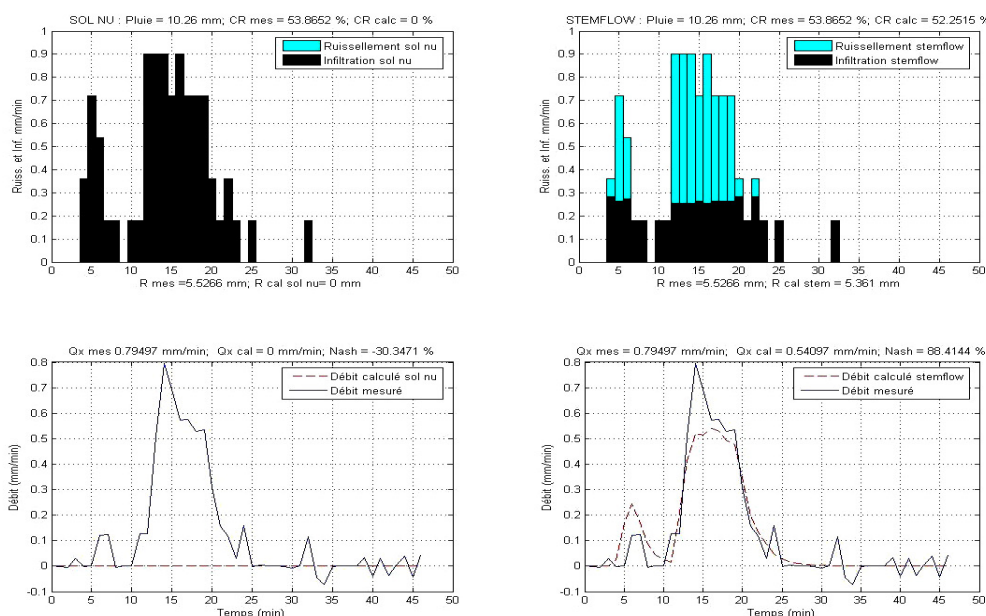


Figure IV-2: Résultats de la procédure de calage sur l'événement 7 (04/07/2004 à 12h05)

Analyse de sensibilité	Paramètres utilisés	Ks	Alpha	Bêta	Sans redistribution	Avec redistribution
<b>Calage</b>	Ks, Alpha, Bêta	<b>60</b>	<b>3,5</b>	<b>0,3</b>	<b>11,889</b>	<b>80,3058</b>
<b>Sensibilité au Ks</b>	Ks - 20%, Alpha, Bêta	<b>48</b>	3,5	0,3	<b>32,6331</b>	<b>79,8119</b>
	Ks + 20%, Alpha, Bêta	<b>72</b>	3,5	0,3	<b>-4,2716</b>	<b>78,7892</b>
<b>Sensibilité au Alpha</b>	Ks, Alpha - 20%, Bêta	60	<b>2,8</b>	0,3	<b>11,889</b>	<b>71,5089</b>
	Ks, Alpha + 20%, Bêta	60	<b>4,2</b>	0,3		<b>73,2939</b>
<b>Sensibilité au Bêta</b>	Ks, Alpha, Bêta - 20%	60	3,5	<b>0,24</b>	<b>11,889</b>	<b>76,3278</b>
	Ks, Alpha, Bêta + 20%	60	3,5	<b>0,36</b>		<b>77,0899</b>

Tableau IV-1: Analyse de sensibilité des paramètres Ks,  $\alpha$  et  $\beta$  par le critère de Nash et Sutcliffe

Dans les figures montrant les résultats, on nomme « modèle sur sol nu » le modèle appliqué sans fonction de redistribution. Le modèle avec redistribution est lui appelé « modèle stemflow » ou « modèle sur sol couvert »

## C.APPLICATIONS ET VALIDATIONS DU MODELE POUR LES EVENEMENTS ETUDIES

Après avoir calé notre modèle et testé sa sensibilité aux différents paramètres, on cherche à le valider sur les 20 événements restants. Cette étape fondamentale permet d'évaluer les performances du modèle. Le Tableau IV-2 nous permet de voir que lorsque l'on applique le modèle aux 20 autres événements ruisselants, le modèle reste performant et explique relativement bien le fonctionnement hydrologique de la placette.

30 événements pour le modèle	Nash avec redistribution	Nash sans redistribution
10 événements de calage	80,3058	11,889
20 événements de validation	74,4735	-4,7937

Tableau IV-2: Bilan des performances du modèle

On remarque également que le modèle sans redistribution ne permet pas d'appréhender correctement ce système hydrologique car le critère de Nash est faible (Figure IV-3).

Nos valeurs de critère de Nash calculés pour le cas du modèle avec redistribution sont relativement élevées et montrent que le modèle explique bien le comportement de la placette lors d'une pluie. L'ensemble des valeurs obtenues pour estimer les performances de la modélisation est disponible en Annexe 4. De plus, l'erreur entre le CR mesuré et le CR calculé permet également d'estimer l'erreur sur les volumes mis en jeu (Figure IV-3). On observe que l'erreur entre les CR calculés et mesurés est très forte dans le cas du modèle sans redistribution. En effet, le CR calculé est toujours inférieur à 20% et très souvent nul alors que les CR mesurés s'élèvent jusqu'à 73%. Par contre, notre modèle avec redistribution donne des résultats de CR calculés proches de ceux mesurés.

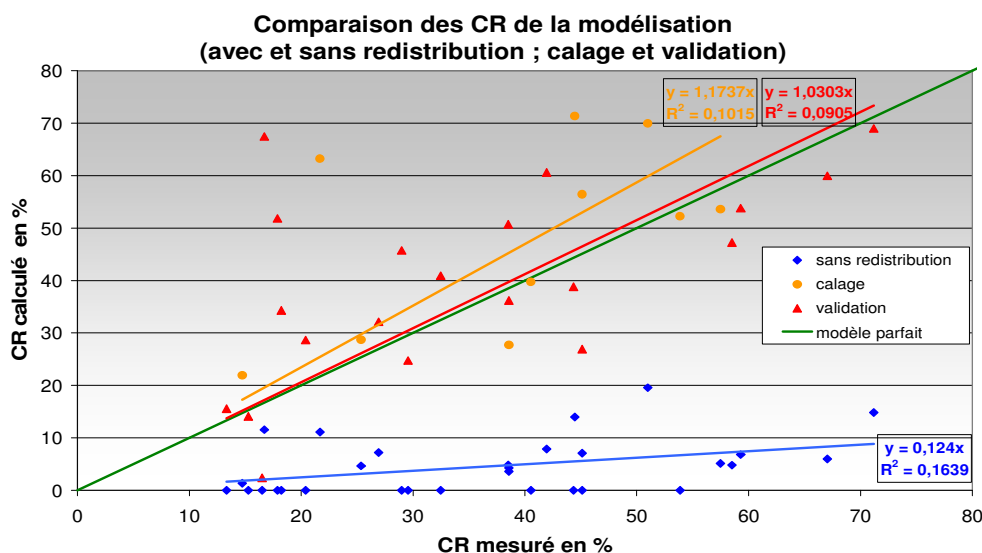


Figure IV-3: Comparaison des CR pour le cas du modèle redistribué (calage et validation) et sans redistribution

## D.DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS SUR LE MODELE

Notre modèle avec redistribution est performant puisqu'il permet de calculer des hydrogrammes qui sont relativement proches de ceux mesurés. La Figure IV-4 permet de comparer les valeurs de Nash obtenus par modélisation dans le cas du modèle sans redistribution et du modèle avec redistribution en fonction de la lame précipitée finale de l'événement en question. Dans un souci de lisibilité, on a supprimé pour ce graphique les valeurs de Nash qui sont inférieures à -50%. On remarque que le critère est bien meilleur globalement dans le cas du modèle avec redistribution. Néanmoins, on constate également que notre modèle simule assez difficilement les événements peu pluvieux. Mais la réponse de ces petits événements possède également une grande incertitude dans la mesure. Par contre, ce modèle se révèle assez robuste pour les forts épisodes. C'est d'autant plus visible sur les graphiques des résultats de la simulation de l'Annexe 4 car on voit bien que les hydrogrammes calculés se rapprochent très fortement de ceux mesurés. Dans le cas du modèle sans redistribution par contre, la simulation est mauvaise pour quasiment tous les événements, ce qui confirme le rôle majeur de la redistribution de la pluie par le bananier.



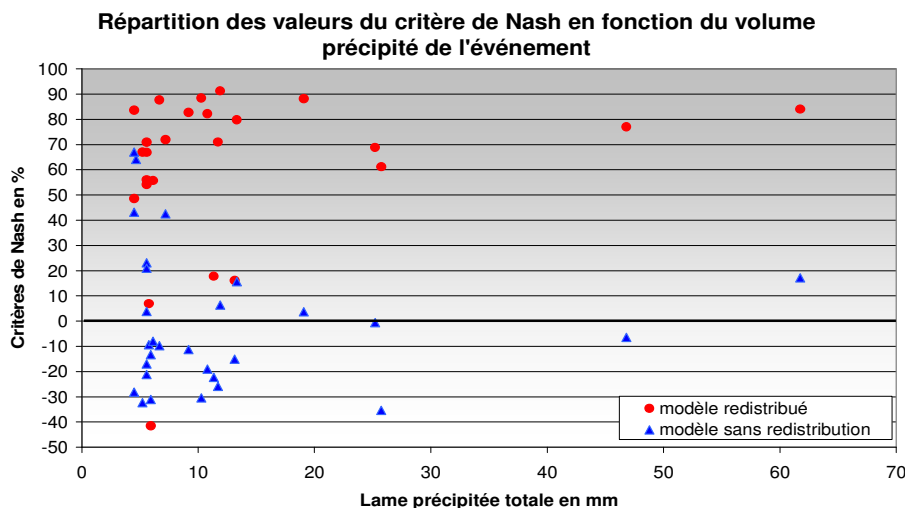


Figure IV-4: Répartition des valeurs des critères de Nash en fonction des lames précipitées

**Finalement, cette modélisation nous permet de valider notre hypothèse de fonctionnement hydrologique du système sol - bananier à l'échelle locale de la placette. Le ruissellement est bien de type hortonien par dépassement de  $K_s$  et les variations spatiales du ruissellement observées sur les vidéos sont dues à la redistribution de la pluie par le bananier.**

Toutefois, il existe des limites dans la précision de notre modèle. En effet, lorsque l'on observe attentivement pour les différents événements les résultats de simulation en modèle avec redistribution, on constate que le tout premier pic de ruissellement est généralement surestimé. On suppose que cela provient de notre fonction de production par dépassement du  $K_s$  qui est considéré comme constant. Or on sait que théoriquement, on a une décroissance de la capacité d'infiltration jusqu'à arriver à la valeur du  $K_s$  à saturation. Dans notre modèle, en rapport avec nos résultats qui ne mettaient pas en évidence l'influence des états hydriques, nous avons choisi une fonction de production très simple avec une capacité d'infiltration constante et égale au  $K_s$ . On considère donc que les sols sont en permanence en état de saturation. Mais cette surestimation du premier pic de ruissellement met donc en évidence que le modèle serait plus précis avec une fonction de production de type Morel-Seytoux, Horton ou Philip par exemple qui mettent en évidence la décroissance de la capacité d'infiltration (Chahinian *et al.*, 2004).

Néanmoins, même s'il peut être amélioré pour rendre plus précise la simulation, il nous a permis de confirmer nos hypothèses de fonctionnement.

## V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons analysé la variabilité spatiale et temporelle du partage ruissellement – infiltration pour le système sol – bananier à la surface d'un andosol de Guadeloupe. Cette étude a été menée à l'échelle locale d'une placette de 8,8 m<sup>2</sup> placée autour d'un bananier. A partir de données vidéo, nous avons observé les phénomènes du ruissellement et émis diverses hypothèses concernant la variabilité observée :

- Il existe certaines zones suralimentées du fait de la redistribution spatiale des pluies opérée par le bananier. Ces zones sont donc saturées plus rapidement et les écoulements apparaissent pour des intensités inférieures à 60 mm/h ;
- La variabilité du ruissellement est due à la variabilité de la taille des surfaces contributives au ruissellement.
- Les phases observées sont déterminées par les intensités pluviométriques qui sont suffisantes ou non pour saturer les différentes zones de la placette.

Ensuite, nous avons analysé des données de pluie et de ruissellement mesurées sur la placette pendant les épisodes pluvieux. Pour cette analyse, nous avons considéré la placette comme une « boîte noire » avec la pluie au dessus du couvert comme entrée et l'infiltration et le ruissellement comme sorties du système. A l'échelle de chaque événement, plusieurs phases chronologiques ont été mises en évidence pour le phénomène de ruissellement. Ces phases sont caractérisées par un coefficient de ruissellement constant et la transition entre deux phases est observée grâce à une rupture nette de ce CR. La chronologie et la durée de ces différentes phases sont gouvernées par les intensités pluviométriques car ce sont elles qui déterminent les changements de dynamique du ruissellement. De plus, on a montré également que le ruissellement de la placette était de type hortonien par dépassement local de la capacité d'infiltration du sol. Le Ks mesuré de la placette est de 60 mm/h si on considère qu'il est homogène pour tous les sols de la placette. Mais si l'on met en relation la pluviométrie et cette valeur d'infiltration, ces sols ne ruisselleraient quasiment jamais. Or le bananier, de par sa surface foliaire très étendue, intercepte et redistribue spatialement la pluie créant des zones de concentration suralimentées avec des intensités très supérieures à celles mesurées au dessus du couvert. Cette concentration de la pluie est particulièrement conséquente au niveau du pseudo tronc du bananier (effet stemflow) et à la périphérie du feuillage (effet égouttage). De ce fait, cette redistribution joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement hydrologique de surface à l'échelle de la placette. Elle permet notamment de déclencher du ruissellement en certaines zones mêmes si les intensités pluviométriques mesurées au dessus du couvert sont inférieures à 60 mm/h qui est le seuil du Ks. Pour confirmer l'influence prépondérante de ce phénomène de redistribution, nous avons créé un modèle simple mais robuste pour tester nos hypothèses de fonctionnement. Ce modèle simule la réponse de la placette à une pluie donnée avec ou sans redistribution de la pluie par le couvert végétal. Avec une fonction de redistribution, les hydrogrammes calculés sont fortement similaires à ceux mesurés ce qui n'est pas le cas en l'absence de redistribution. Cela nous permet de valider nos hypothèses de fonctionnement liées à la redistribution de la pluie opérée par le bananier.

Néanmoins, il subsiste certaines interrogations quand au fonctionnement hydrologique de la placette. En effet, l'influence des états hydriques du sol n'a pas été mis en évidence ce qui n'est pas en accord avec le modèle de ruissellement hortonien par dépassement de Ks. On interprète cette observation en supposant que les andosols sont des sols à la fois très filtrant mais qui également, ne sont jamais en état de déficit hydrique du fait des conditions climatiques guadeloupéennes. Par ailleurs, nous avons remarqué que les pluies qui tombent lorsque le ruissellement est fort (phase 2) ruissellent pour des intensités plus faibles que celles nécessaires au déclenchement du ruissellement. Parallèlement, on constate que les flux d'infiltration semblent diminuer au cours d'un événement. Pour expliquer cela, on suppose que lorsque le ruissellement est fort (CR = 60%), de nombreuses zones sont saturées. Dès lors, la pluie qui tombe sur ces surfaces saturées est automatiquement emportée avec les écoulements préexistants. Proportionnellement, la quantité d'eau infiltrée diminue car celle ruisselée augmente. Il est par ailleurs probable qu'une macroporosité des andosols influence le comportement hydrologique de la placette et ces macropores pourraient être responsables de ces observations. Ce travail sur l'évolution des flux d'infiltration serait donc à approfondir. Cela permettrait notamment d'établir la relation de décroissance du Ks au cours d'un événement pluvieux. Cette relation pourrait ensuite être introduite dans la fonction de production du modèle ce qui améliorerait sensiblement la prédiction de l'hydrogramme de ruissellement.

D'autre part, des mesures précises de la redistribution des pluies permettraient d'améliorer la caractérisation spatiale des intensités réellement incidentes sur les sols de la placette. Ainsi, en relation avec d'autres tests d'infiltration sur l'ensemble de la placette, le modèle pourrait être particulièrement performant. Le ruissellement généré par les pluies serait donc connu de manière précise et permettrait d'analyser les transferts de polluants par ruissellement.

Enfin, une analyse fréquentielle des pluies serait utile pour définir les conditions limites du modèle et pour pourvoir l'appliquer à des plus grandes échelles (parcelle, bassin versant...) dans la perspective d'une modélisation mécaniste des transferts de polluants en Guadeloupe.

## Références Bibliographiques

### Articles scientifiques :

- Bussière F., 1995. Rainfall interception by plant canopies, consequences for water partitioning in intercropping systems. In: *Ecophysiology of Tropical Intercropping*, H. Sinoquet and P. Cruz eds. INRA, Paris: 163-174.
- Cabidoche Y.-M., 2003. Gestion de l'azote dans les D.O.M. insulaires. Etat des lieux, besoins de recherche. Expertise pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, septembre 2001. INRA Antilles Guyane, Unité Agropédoclimatique de la Zone Caraïbe, Petit-Bourg, Guadeloupe (France), 68 p.
- Cattan P., Bussière F. and Nouvellon A., 2006. Effect of rainfall partitioning by banana (*Musa spp.*) canopies on soil water transfers. *Hydrological processes*, article in press.
- Cattan P., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G., Voltz M., 2005. Effects of tillage and mulching on runoff under banana (*Musa spp.*) on a tropical Andosol. *Soil and Tillage research*, 86, 38-51.
- Cattan P., Cabidoche Y.-M., 2002. Etude des risques de pollution d'origine agricole en Martinique et Guadeloupe. Restitution des résultats obtenus auprès des institutions et de la profession agricole. Neufchâteau le 23/10/2002, Guadeloupe France.
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P. and Voltz, M., 2006. Accounting for temporal variation in soil hydrological properties when simulating surface runoff on tilled plots. *Journal of Hydrology*, 326(1-4): 135-152.
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P. and Voltz, M., 2004. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*, xx, 1-24.
- Champoiseau A., 2002. Analyse des transferts d'eau en bananeraie : étude du partitionnement des eaux en ruissellement et en drainage pour deux systèmes de culture. Mémoire de fin d'étude, ISTOM.
- Charlier J.B., Desbois P., Cattan P., 2006. Rapport interne au CIRAD.
- Dorel M., Roger-Estrade J., Manichon H. and Delvaux B., 2000. Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soil. *Soil Use and Management*, 16, 133-140.
- Gouyer S., 2001. Evaluation du transport par ruissellement de surface sur andosol. Mémoire de fin d'étude, ISTOM.
- Heuzé S., 2005. Hydrological behaviour of banana crops on a tropical soil: Estimation of the properties of an andosol and identification of the water processes at local scale. MSc Water Management, Cranfield University at Silsoe.
- Javelle P., 2001. Caractérisation du régime des crues : le modèle débit - durée - fréquence convergent, approche locale et régionale. 277 pages.
- Léonard J., Ancelin O., Ludwig B., Richard G., 2005. Analysis of the dynamics of soil infiltrability of agricultural soils from continuous rainfall-runoff measurements on small plots. *Journal of hydrology*, In press, Corrected Proof, Available online 13 December 2005.
- Martin J., 2004. Observation et quantification des principaux processus gouvernant le fonctionnement hydrologique du système sol-bananier sur andosol de Guadeloupe, à l'échelle locale de la placette. Mémoire du DESS Hydrogéologie et Environnement, Université d'Avignon et des pays du Vaucluse.
- Moussa R., Bocquillon C., 1996. Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation. *Hydrological Processes*, 10(1): 105-123.
- Nash, J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I : a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
- Sansoulet J., 2002. Modification de l'énergie cinétique de la pluie redistribuée par le bananier, influence de la géométrie des feuilles. Mémoire de DEA, INA-PG - Un. ParisVI – ENS: 26p.+annexes.

### Sites Internet :

<http://www.guadeloupe.ecologie.gouv.fr/>, DIREN Guadeloupe, Août 2006.

<http://www.meteofrance.com/>, Météo France, Août 2006.



## ***Diffusion du mémoire***

à remplir avec le Responsable Scientifique

### **Préciser les limites de la confidentialité <sup>(1)</sup> :**

Confidentialité absolue : ☐ oui ☒ non  
Résumé diffusable : ☒ oui ☐ non  
Consultation : ☒ sur place ☐ reproduction ☐ prêt  
Durée de la confidentialité : **Jusqu'au 01/01/2008**

### **Personne et/ou organisme à contacter :**

Nom : RUY Stéphane

Adresse : INRA - UMR CSE – Bât. Sol - Domaine St Paul – Agroparc – 84914 Avignon Cx9

Tél. : 04 32 72 22 37

Fax : 04 32 72 22 12

Le Responsable Scientifique (signature) :

L'auteur (signature) :



S. Ruy

P.DESBOIS

Les membres du Jury (Nom - prénom - Organisme) :

---

(1) L'administration et les différentes documentations de l'ENSAR s'engagent à respecter cette éventuelle confidentialité.

 <p><b>ENSA</b> R E N N E S</p>	 <p>Spécialisation : <b>Génie de l'Environnement</b> Option : <b>EAU</b> Enseignant Responsable de l'option : <b>Mr Hervé NICOLAS</b></p>	 <p>Cadre réservé à la Bibliothèque Centrale</p>
<p>Auteur(s) : <b>DESBOIS PIERRE</b></p>	<p>Organisme d'accueil :</p> 	
<p>Nombre de pages : 31      Annexe(s) : Année de soutenance : 2006 Enseignant responsable du stage : <b>Z.THOMAS</b></p>	<p>Responsable scientifique (maître de stage) : <b>Philippe CATTAN</b> : CIRAD FHLOR, Guadeloupe <b>Stéphane RUY</b> : INRA CSE, Avignon <b>Antoine FINDELING</b> : CIRAD AMI, Montpellier</p>	
<p><b>Titre</b> : ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE ET TEMPORELLE DU PARTAGE RUISSELLEMENT - INFILTRATION DE LA PLACETTE POUR LE SYSTÈME SOL-BANANIER. ETUDE À L'ÉCHELLE LOCALE DE LA PLACETTE À LA SURFACE D'UN ANDOSOL DE GUADELOUPE.</p>		
<p><b>Résumé</b> :</p> <p>Ce mémoire s'intéresse au partage ruissellement – infiltration à l'échelle locale de la plante et de son environnement immédiat pour le système sol – bananier sur andosols de Guadeloupe. Il repose sur l'analyse des données pluie - flux de ruissellement complétée par l'analyse des vidéos du ruissellement. Celles-ci montrent que la genèse du ruissellement présente une variabilité spatiale caractérisée par certaines zones contributives au ruissellement tandis que d'autres zones infiltrent la pluie incidente. Les zones contributives peuvent être reliées aux zones de concentration de la pluie incidente par le bananier (stemflow, zones d'égouttages des feuilles). Le ruissellement présente également une évolution temporelle à l'échelle de l'évènement pluvieux qui est liée aux intensités pluviométriques. L'analyse approfondie de données de pluies et de ruissellement recueillies au cours de l'été 2004 permet de différencier plusieurs phases successives dans la dynamique du ruissellement. Elles sont marquées par un coefficient de ruissellement (CR) constant par morceaux avec une rupture nette entre les deux premières phases. Cette rupture est régie par les intensités pluviométriques. Nous concluons que le ruissellement est de type hortonien par dépassement de la conductivité hydraulique à saturation <math>K_s</math> mesurée (<math>K_s=60\text{mm/h}</math>). Mais dans ce cas et en l'absence de concentration de la pluie par le bananier, les intensités pluviométriques mesurées ne permettent pas d'expliquer un tel ruissellement. Notre hypothèse est donc que la redistribution des pluies par le bananier permet, par apports concentrés en certaines zones, d'expliquer nos observations. Cette hypothèse est testée en créant un modèle pluie débit incluant une fonction de redistribution de la pluie. Les résultats de la modélisation valident cette hypothèse et confirment donc l'influence prépondérante de la redistribution des pluies dans le fonctionnement hydrologique du système sol – bananier à l'échelle locale de la plante.</p> <p><b>Mots clés</b> : Ruissellement, Intensités pluviométriques, Stemflow, Andosol, Bananier.</p>		
<p><b>Abstract</b>:</p> <p>This study deals with the runoff and infiltration division at local scale of the plant and its immediate environment for soil and banana tree system on an Andosol of Guadeloupe (French Caribbean Island). It is based on the analysis of the rainfall and runoff data supplemented by the analysis of runoff videos. Those videos show that the genesis of runoff has a spatial variability characterized by certain contributive surfaces on runoff while others continue to infiltrate the incidental rainfall. The participating zones can be connected to the zones of concentration of rainfall by the banana tree (stemflow, dropping zones under the sheets). Runoff also presents a temporal evolution at the scale of the rainy event which is related to rainfall intensity. A thorough analysis of runoff and rainfall data collected during summer 2004 enables us to distinguish several successive phases in the runoff dynamic. They are marked by a runoff coefficient (CR) constant per pieces with a clear rupture between the first two phases. This rupture is governed by rainfall intensities. We conclude that runoff is of hortonien type by going beyond of the saturated hydraulic conductivity <math>K_s</math> measured (<math>K_s=60\text{mm.h}^{-1}</math>). But in this case and with absence of rainfall concentration by the banana tree, the measured rainfall intensities do not make it possible to explain such a runoff. Our assumption is thus that the rainfall redistribution by banana tree allows, by concentrated contributions in certain zones, to explain our observations. This assumption is tested by creating a rainfall runoff model including a rainfall redistribution function. The results of runoff modelling validate this assumption and thus confirm the influence of rainfall redistribution on hydrological processes of the system andosol - banana tree at local scale of the plant.</p> <p><b>Keywords</b>: Runoff, Rainfall Intensity, Stemflow, Andosol, Banana tree.</p>		
<p align="center"><b>Diffusion limitée jusqu'au 01/01/2008</b></p>		

Je soussigné, RUY Stéphane, propriétaire des droits de reproduction du résumé du présent document, autorise toutes les sources bibliographiques à signaler et publier ce résumé.

Date : le 11 Septembre 2006, à Avignon,

Signature,

